



# R&D 网络的自组织演化模型 及其仿真研究

张延禄, 杨乃定, 郭 晓  
西北工业大学 管理学院, 西安 710072

**摘要:**从复杂适应系统理论出发,将 R&D 网络的演化视为复杂系统的自组织过程进行研究。从宏观阶段划分、微观企业行为规则和网络特征统计量 3 个维度构建 R&D 网络自组织演化的分析框架,基于复杂网络理论建立 R&D 网络自组织演化的理论模型,运用数值仿真方法揭示其演化规律以及知识溢出效率对网络特征统计量的影响。研究结果表明,R&D 网络的自组织演化过程最终可达到稳定状态,企业具有择优连接的意识,使网络呈现出无标度和集聚特征,知识溢出效率对网络规模、网络利用效率具有显著影响,这为政府正确制定宏观政策提供了理论依据。利用诺基亚的 R&D 网络对上述理论模型进行验证,模型与实际网络基本吻合,在一定程度上说明模型的正确性。

**关键词:**R&D 网络;自组织演化;复杂适应系统;复杂网络;仿真

**中图分类号:**N94 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-0334(2012)03-0010-11

## 1 引言

面对需求的多变性、技术的复杂性和资源的有限性,单个企业仅靠自身力量已无法应付环境的瞬息万变和满足技术交叉融合的需要,于是单个企业结成网络进行合作研发就成为企业获取竞争力的必然趋势。如 IBM 在 1985 年至 2002 年间与 227 个企业结成网络,并利用该网络实现从硬件生产到全球性软件服务的战略转型<sup>[1]</sup>。R&D 网络是研发企业间为达到共同开发新产品或新技术、获得互补的研发资源、缩短研发时间以及降低研发成本等战略目标,通过契约、合作协议或社会关系而形成的能够自我学习的技术创新网络<sup>[2]</sup>。R&D 网络作为一个开放式组织,由于企业进出网络时具有较大的自主性和高度的动态性,因而整体具有自组织的动态演化特征<sup>[3]</sup>。但由于外部环境的多变性以及企业行为的非理性和多元性,R&D 网络自组织演化的复杂性特征日益凸显,并极易受某些关键因素的影响,这为保持网络的持续健康发展提出了巨大挑战。在此背景下,有必要对 R&D 网络自组织演化过程和内在机制进行深入研

究。鉴于目前传统还原论方法很难揭示微观企业间的交互行为对整体 R&D 网络演化的作用关系,本研究借鉴复杂适应系统理论,将 R&D 网络视为由众多适应性主体(微观研发企业)组成的复杂系统,并运用复杂网络的研究成果深入揭示 R&D 网络自组织演化机制,以期得到一些有益的结论。

## 2 相关研究评述

目前,关于 R&D 网络演化机制的研究大多从宏观和微观两个视角展开。宏观视角主要集中在对 R&D 网络组织形式如何演化的定性研究上。Von Zedtwitz 等<sup>[4]</sup>按照研发投入分散程度和研发机构合作程度,将跨国研发的组织模式依次分为本土集中式、地区集中式、多中心分散式、中心-边缘式、整合的研发网络式 5 种类型,并认为整合的研发网络模式将最终发展为一种新兴的研发模式; Bartlett 等<sup>[5]</sup>根据研发主体的分布规模大小,依次将 R&D 网络分为中央创新、当地化创新、借力地方型创新和全球联动型创新 4 种类型,认为全球联动型创新是将分散在

收稿日期:2011-09-15 修返日期:2012-03-03

基金项目:国家自然科学基金(70972126);高等学校博士学科点专项科研基金(20106102110042)

作者简介:张延禄(1984-),男,山东潍坊人,西北工业大学管理学院博士研究生,研究方向:管理系统工程和项目管理等。E-mail:zhangyanlu0789@163.com

全球具有不同创新资源和能力的企业联系起来,形成全球互动型的研发网络;曾德明等<sup>[6]</sup>将企业R&D网络分为变动性和稳定性网络,认为最初时企业为了获取创新资源需要与其他主体建立联系,此时网络边界会自主扩张,之后随着进出网络的企业数量达到相对均衡,此时R&D网络会趋于相对稳定状态。

微观视角主要集中在对R&D网络微观企业如何优化研发决策使自身收益最大化的定量研究上。d'Aspremont等<sup>[7]</sup>针对双寡头研发企业建立两阶段博弈模型,提出当研发的溢出效应超出一定程度时合作研发比独立研发可以更快地促进企业的技术创新;Suzumura<sup>[8]</sup>在d'Aspremont等<sup>[7]</sup>研究的基础上对该博弈模型中的产品需求和成本函数进一步完善,同时将研究的企业数量扩展到两个以上;之后更多的学者把研发活动和网络经济联系起来,Bala等<sup>[9]</sup>、Kranton等<sup>[10]</sup>和Goyal等<sup>[11]</sup>着重探讨研发网络的形成及其对企业研发活动的影响。但上述研究均把自主研发和合作研发作为两个相互排斥的部分,实际上在R&D网络内部,自主研发和合作研发是同时存在的。于是Goyal等<sup>[12]</sup>建立整合自主研发和合作研发的战略博弈模型,分析在这种混合模式下企业的最优化决策问题;周青等<sup>[13]</sup>建立企业R&D网络化的动态博弈模型,分析在R&D网络竞争、R&D网络卡特尔和产业最优化R&D网络3种不同研发模式下企业的均衡投资策略问题;之后周青等<sup>[14]</sup>又通过整合自主研发和合作研发,建立企业R&D网络化动态博弈模型,提出在研发活动密集的行业网络化研发比单纯的自主研发更具竞争优势。

以上综述表明,已有研究割裂了作为微观个体的研发企业的行为规则与网络整体演化之间的作用关系,尚未清晰地阐述R&D网络演化的内在动力及关键影响因素,同时大多数研究结论没有得到现实数据的验证和支持。同时,R&D网络作为动态复杂系统,其演化过程实质上就是微观企业不断选择加入或退出网络的自适应行为。研发企业作为独立的经济个体,其选择加入或退出网络不是盲目和被动的,而是在获得互补技术、节省研发成本、分散研发风险以及获得战略网络能力等多种因素的共同驱动下进行的<sup>[15]</sup>。而且研发企业也会根据自身的研发需要积极主动地与其他企业交流信息和搜寻显性知识,还会利用一切机会去学习技术、诀窍等隐性知识,从而不断优化与其他企业的合作关系。研发企业的这种自主性、自发性和自适应性等特点,使R&D网络具有复杂自适应的特点。

基于上述分析,本研究借鉴复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)理论的思想,将R&D网络的演化视作复杂适应系统的自组织行为进行深入研究。CAS理论最大的贡献在于提供了一种自下而上的建模方法,借用微观主体之间的交互作用反映宏观系统的复杂变化,能够将微观与宏观有机联系起来,合理解释复杂系统的发展和演进机制。同时,复

杂网络的研究成果也为本研究提供了可能,这种研究方法最突出的特点就是既能在一定程度上表现微观研发企业的行为规则,又能测度整体R&D网络的演化趋势和特征,起到连接微观与宏观的桥梁作用。因此,本研究借鉴CAS理论和复杂网络的研究成果,在建立R&D网络自组织演化模型的基础上进行数值仿真,以揭示其演化机制,最后通过诺基亚R&D网络的具体实例对理论模型进行验证。

### 3 R&D网络自组织演化的分析框架

#### 3.1 宏观阶段划分

R&D网络与其他复杂系统一样,演化过程同样会经历从产生到衰退的历程,通常包括起始、成长、调整和衰退4个阶段。根据CAS理论,作为适应性主体的微观研发企业,在与外部环境及其他主体的交互过程中能够不断自我学习或积累经验,并根据学到的知识适时改变自身的结构和行为方式,从而做出选择或退出网络的自适应行为。研发企业的这种自适应特点导致整体网络经常处于“远离平衡点”的临界状态,从而使R&D网络在较长一段时间内处于不断发展的自组织过程。因此,R&D网络的自组织演化过程主要包括前3个阶段,即起始、成长和调整阶段。

在起始阶段,受降低研发风险、获取研发资源以及提高创新成功率等潜在需求的驱动,具有知识优势并掌握行业关键核心技术的研发企业根据自身需求主动搜寻潜在的合作伙伴,从而形成研发联盟,这是R&D网络处于起始阶段的组织形态,如IBM、东芝和西门子结成三边联盟共同研发新型电脑芯片,波音公司与三菱重工结成联盟共同开发波音767宽体民用喷气客机等。在研发联盟中,主动搜寻合作伙伴的企业被称为核心企业,而那些被动等待选择的企业被称为外围企业。核心企业为了选择合适的合作伙伴,会投入大量的人力和物力对外围企业的信誉、研发能力和合作经验等进行全方位的考核,并最终与外围企业建立直接合作关系,而外围企业之间由于缺乏信任基础,只能通过核心企业的中介作用形成间接合作关系。因此,研发联盟呈现出以核心企业为中心的星型网络结构。

进入成长阶段,随着信息和通讯技术的迅猛发展、创新周期的缩短、市场竞争的日益激烈以及研发企业之间资源禀赋的差异性和互补性日益明显,研发企业之间合作创新的需求随之增强,彼此之间也更容易建立起合作关系。因此,处于成长阶段的R&D网络的自组织演化主要体现为网络规模效应的形成,即网络成员企业数量的增加<sup>[16]</sup>。当然,网络规模越大意味着企业能够获取的研发资源越丰富<sup>[17]</sup>,但是过高的规模也会导致企业之间因具有不同的管理模式、目标和战略而产生研发信息的传递冲突、路径依赖和锁定等负效应,并最终阻碍企业间合作目标的实现<sup>[16]</sup>。因此,适度的网络规模才是实现研发资源集聚效应的关键。



R&D 网络进入调整阶段,在调整阶段,R&D 网络的自组织演化实际上就是网络内成员企业之间不断选择和相互试错的过程,即那些具有先进技术、良好信誉和较大竞争力、联系频繁的核心企业可能会被选择继续合作,而经常不被选择的外围企业可能逐渐退出网络<sup>[18]</sup>。最终,通过该阶段企业与环境、企业与企业之间的相互适应和不断调整,R&D 网络将在较长一段时间内处于稳定的状态。

### 3.2 微观企业行为规则

基于 CAS 理论,R&D 网络的整体演化是由微观研发企业的相互作用推动的,其本质是研发企业不断进行“选择-合作-学习-选择”的周期性行为。按照这种行为规则,研发企业之间建立合作关系(粘着),并根据自身需要去继续寻找网络内或网络外的其他企业进行合作,从而形成介主体,介主体与介主体之间还可以聚集成更大的介主体,推动 R&D 网络的出现。

为了从微观层面描述研发企业的这种行为规则,本研究运用霍兰提出的刺激-反应模型进行深入分析。该模型用来描述不同适应性主体的统一行为方式,主要包括探测器、IF/THEN 规则集合、效应器 3 个部分<sup>[19]</sup>。研发企业通过探测器感知外部环境的刺激(即信息),将这些信息进行分类处理并传递给自身内部,这是研发企业对环境刺激做出的第一步反应。本研究把研发企业面临的外部环境分为资源禀赋和不确定性两个维度,其中资源禀赋是指影响企业研发的一切资源,包括市场信息、技术因素、政府因素、地域文化、风俗习惯以及来自其他企业的信息等。IF/THEN 规则是表达主体行为的最基本模式,它将企业的行为看成是由一组规则集合决定的行为,其基本形式是 IF 刺激发生,THEN 做出反应。例如,当某研发企业的一项技术创新获得成功,势必给其他企业带来影响;其他企业便将获取到的这一信息与已有规则集合进行匹配,发现可供采取的行动有与其他企业合作研发、独立研发、购买该企业的技术等;然后企业在权衡自身实际情况之后,选择这些规则集合中适应度最高的规则作为最佳应对策略。本研究基于复杂网络的理论,用节点企业之间的连接强度、连接内涵和连接方向 3 个维度来说明 IF/

THEN 规则集合。连接强度指连接的权重关系,即如果节点间尚未建立合作关系,则连接强度为 0;连接内涵指连接的具体内容,主要分为信息和产品两类,产品网代表节点间形成的正式有形网,信息网代表节点间形成的非正式无形网<sup>[20]</sup>;连接方向是指企业间的连接是单向还是双向的。最后,研发企业按照上述规则集合并最终通过效应器做出应对策略,因此效应器代表企业的具体行为。在任何给定时刻,效应器一旦被合适的信息激活,它将对企业自身以及外部网络产生影响,而这些行为所产生的后果将成为下一时刻其他企业的探测器所获取的刺激,从而激起它们做出下一步的反应,研发企业就是通过彼此之间的持续互动和反馈来推动 R&D 网络从无序向有序、从低级向高级的自组织演化。基于上述分析,本研究建立研发企业的刺激-反应模型,如图 1 所示。

### 3.3 网络特征统计量

虽然单个研发企业的具体行为具有一定的随机性,但整个 R&D 网络在自组织演化过程中会呈现出某些显著的特征。因此,本研究借鉴复杂网络中的度分布、聚集系数、平均路径长度和平均收益系数等统计指标来反映 R&D 网络自组织演化的整体特征。

#### (1) 度分布

节点的度表示与该节点存在直接连接关系的节点数量,用函数  $P(k)$  表示一个随机选定的节点的恰好为  $k$  的概率,其反映 R&D 网络中节点的度分布状况,即

$$P(k) = \frac{n_k}{N} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

其中,  $n_k$  为度为  $k$  的节点个数,  $N$  为网络中的节点总数。有时也采用平均度指标  $\langle k \rangle$ ,它是网络所有节点度的平均值,反映研发企业利用网络资源进行资源整合的广度,即

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_i k_i \quad (2)$$

其中,  $i$  为网络中的第  $i$  个节点,  $1 \leq i \leq N$ ;  $k_i$  为节点  $i$  的度。

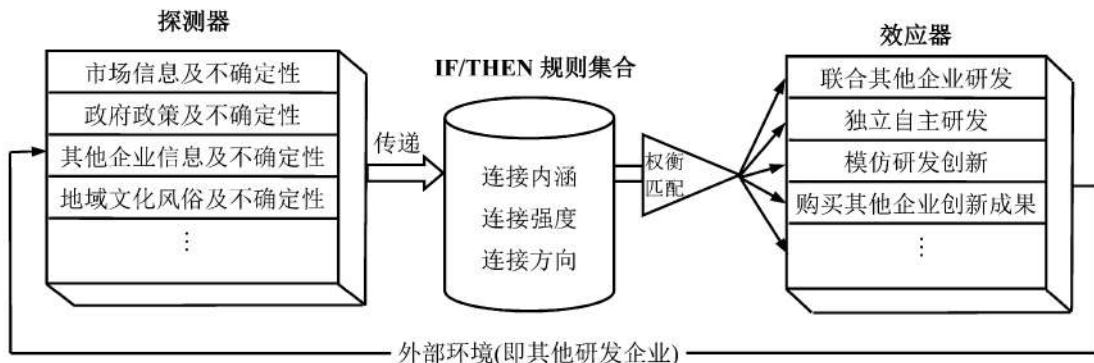


图1 研发企业的刺激-反应模型

Figure 1 Stimulus-Response Model of R&D Enterprise

(2) 聚集系数

假设某一节点  $i$  的度为  $k_i$ , 若这  $k_i$  个节点之间同时存在  $\varphi_i$  条相互连接的边, 它们之间最多可能存在  $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$  条边, 于是将节点  $i$  的聚集系数  $c_i$  定义为

$$c_i = \frac{2\varphi_i}{k_i(k_i-1)} \quad (3)$$

当  $k_i = 0$  或  $k_i = 1$  时, 令  $c_i = 0$ 。此时整个网络的聚集系数  $C$  为

$$C = \frac{1}{N} \sum_i c_i \quad (4)$$

聚集系数反映了 R&D 网络内部的小团体特征, 数值越大, 意味着群落特征越明显。

(3) 平均路径长度

网络中任意两个不同节点  $i$  与  $j$  之间的网络距离  $d_1(i, j)$  定义为连接这两点的最短路径的边数, 如果节点  $i$  和  $j$  在网络中不存在连通路程, 则令  $d_1(i, j) = \infty$ 。于是网络的平均路径长度  $L$  被定义为网络中存在连通路程的任意两节点之间网络距离的平均值, 即

$$L = \frac{\sum_{d_1(i,j) \neq \infty} d_1(i, j)}{M} \quad (5)$$

其中,  $M$  为网络中所有存在连通路程的节点对数量。平均路径长度反映网络内研发企业之间获取资源的效率, 路径越长, 说明企业需要经过越多的“中介企业”才能获取资源, 因而成本越高, 效率越低。反之, 效率越高。

(4) 平均收益系数

平均收益系数  $E(t)$  被定义为网络在  $t$  时刻所积累财富的平均值, 也称为网络的利用效率, 同时称  $E(t)$  达到最大值时的网络为有效网络。本研究假设企业  $i$  在  $t$  时刻的研发收益为  $s_i(t)$ , 则所有企业收益的平均值即为网络的平均收益系数, 即

$$E(t) = \frac{1}{N} \sum_i s_i(t) \quad (6)$$

综上, 本研究将 R&D 网络的自组织演化过程分为起始、成长和调整 3 个宏观阶段, 从微观视角通过建立刺激 - 反应模型揭示微观研发企业的行为规则, 并引入度分布(或平均度)、聚集系数、平均路径长度和平均收益系数来表征 R&D 网络自组织演化的整体特征。由此, 本研究构建 R&D 网络自组织演化的分析框架, 如图 2 所示。

4 R&D 网络自组织演化模型构建

4.1 基本概念

假设 R&D 网络是由  $N$  个研发企业组成的开放系统, 节点代表 R&D 网络中的研发企业, 两点间的连线代表企业之间的合作伙伴关系。因此, 本研究将 R&D 网络的所有节点集合记为  $V, V = \{1, 2, \dots, N\}$ , 所

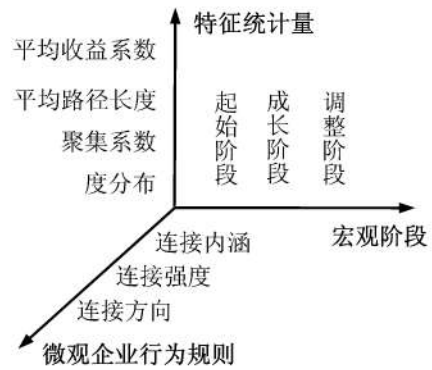


图2 R&D网络自组织演化的分析框架

Figure 2 Analytical Framework of Self-organization Evolution of R&D Network

有的节点连线集合记为  $g, g = \{ij | i, j \in V\}$ ,  $ij$  为连接节点  $i$  和  $j$  的边, 最终 R&D 网络表示为  $\{V, g\}$ , 由于节点连线集合  $g$  中包含了节点的数量信息, R&D 网络也可被简记为  $g$ 。现实中企业之间的合作研发关系往往是相互的, 因此, 本研究的 R&D 网络是无向网络。为了简化, 假设研发企业之间的连接权重取值为 0 或 1, 1 为已经建立合作关系, 0 为尚未建立合作关系。令  $g' = g + ij = g \cup \{ij\} (ij \notin g)$  或  $g' = g - ij = g \setminus \{ij\} (ij \in g)$ , 此时将  $g'$  称为网络  $g$  的相邻网络。同时, 记所有与节点  $i$  存在直接连接关系的节点集合为  $\Gamma_i, \Gamma_i = \{j | ij \in g\}$ , 此时节点  $i$  的度  $k_i$  即为集合  $\Gamma_i$  中所有元素的个数。此外, 本研究引入节点  $i$  与  $j$  之间空间距离  $d_2(i, j)$  的概念, 即

$$d_2(i, j) = \min\{|j - i|, |N - j + i|\} \quad (7)$$

4.2 模型构建

基于 CAS 理论, 研发企业选择合作伙伴、建立和解除合作关系等一系列行为导致 R&D 网络的自组织演化, 而研发企业做出上述决策的最基本出发点就是实现自身收益的最大化。具体的决策过程就是在某一时刻, 网络中存在一对已有连线的企业, 如果至少有一个企业认为删除连接将会对他更好, 那么这两个企业将会删除连接关系; 或者存在一对未有连线的两个企业, 如果他们认为添加连接会对双方都有利, 那么这两个企业将会建立连接关系, 否则这两个企业将保持原有的关系不变。可以看出, 研发企业追求自身收益最大化是促使 R&D 网络自组织演化的内在动力, 从而推动整个网络处于动态变化之中。不可否认, R&D 网络最终有可能会达到稳定状态, Jackson 等<sup>[21]</sup> 给出网络处于稳定状态时的正式定义, 即如果一个网络  $g$  被称为是稳定的, 它必须满足以下两个条件, ① 对于所有的  $ij \in g, s_i(g - ij) \leq s_i(g)$  并且  $s_j(g - ij) \leq s_j(g), s_j$  为节点  $j$  的研发收益; ② 对于所有的  $ij \notin g$ , 如果  $s_i(g + ij) > s_i(g)$ , 则必有  $s_j(g + ij) < s_j(g)$ 。下面本研究将定义企业  $i$  在  $t$  时刻的研发收益  $s_i(t)$ 。

企业进行研发活动需要具备一定的知识储备,

但由于在各类知识禀赋上存在一定差异,有必要利用外部资源,即与其他企业进行合作和学习来实现知识的互补,这种学习和合作行为将对 R&D 网络的自组织演化产生重要影响。在此,假设每个研发企业具备两类知识,即将企业  $i$  的知识禀赋  $\omega_i$  表示为  $\omega_i = (\omega_{iA}, \omega_{iB})$ ,  $\omega_{iA}$  为企业  $i$  自身具备的 A 类知识,  $\omega_{iB}$  为企业  $i$  自身具备的 B 类知识。在 R&D 网络中,企业的知识积累水平一方面来自于企业自身的知识增加,另一方面来自于从网络中获得的知识溢出,而知识溢出主要是企业通过直接或间接的合作获得的。因此,将企业  $i$  在  $t$  时刻获得的知识积累量  $m_i(t)$  定义为

$$m_{iA}(t) = \omega_{iA} + \sum_j \delta^{d_1(i,j)} \max\{0, \omega_{jA} - \omega_{iA}\} \quad (8)$$

$$m_{iB}(t) = \omega_{iB} + \sum_j \delta^{d_1(i,j)} \max\{0, \omega_{jB} - \omega_{iB}\} \quad (9)$$

其中,节点  $j$  指  $t$  时刻与企业  $i$  存在直接或间接连接关系的企业; $\delta$  为知识溢出效率,  $0 \leq \delta \leq 1$ , 表示企业之间知识递减的速度,  $\delta$  值越小, 知识递减的速度越快, 而且企业  $i$  获取的知识溢出量随着企业之间网络距离的增大而减小, 因此  $\delta$  也称为距离衰减系数。研发企业运用自身创造的以及直接或间接取得的知识进行研发活动, 从而获得收入, 在此本研究借鉴柯布-道格拉斯生产函数的思想, 提出企业  $i$  在  $[t, t+1]$  期间获得的研发收入  $R_i(t)$  与知识积累量  $m_i(t)$  存在如下函数关系, 即

$$R_i(t) = \sqrt{m_{iA}(t) \cdot m_{iB}(t)} \quad (10)$$

与此同时, 企业进行合作研发需要付出相应的成本, 包括两部分。一部分是研发的固定成本, 即内部成本; 另一部分是变动成本, 即企业与其他企业进行合作(直接或间接合作)所付出的成本。于是定义企业  $i$  在  $[t, t+1]$  期间付出的研发成本  $H_i(t)$  为

$$H_i(t) = H_0 + \sum_{j \in V} h \cdot d_2(i, j) \quad (11)$$

其中,  $H_0$  为固定成本,  $h$  为单位距离成本系数。最后, 综合(10)式和(11)式可定义企业  $i$  在  $[t, t+1]$  期间的研发收益函数为

$$s_i(t) = \sqrt{m_{iA}(t) \cdot m_{iB}(t)} - H_0 - \sum_{j \in V} h \cdot d_2(i, j) \quad (12)$$

企业在自身收益最大化的驱动下, 根据环境变化不断调整自身行为(建立、维持或删除连接等)。但不管是建立合作关系(边的增加)还是解除合作关系(边的删除), 都涉及到企业如何选择合作伙伴的问题。因此, 本研究根据 R&D 网络在成长阶段和调整阶段的不同演化特征, 确定研发企业选择合作伙伴的规则。

进入成长阶段, 随着通讯技术的便利以及企业研发资源之间具有的互补性和差异性, 企业之间更愿意和更容易建立合作关系。在此背景下, 处于该阶段 R&D 网络自组织演化的最主要特征表现为网络规模(即成员企业数量)的迅速增加。一方面, 网

络在位企业不断寻求网络外企业, 并与其缔结新的合作关系; 另一方面, 网络外企业为了获取 R&D 网络的知识溢出, 也会积极与在位企业寻求合作, 两者共同导致网络规模效应的快速凸现。于是, 本研究假设每经历一个演化周期, 就有一个新的节点企业  $j$  试图与在位企业寻求合作。当然, 由于信息的不完全以及企业随机选择合作伙伴可能带来的经济损失, 新企业  $j$  在选择合作伙伴时往往具有一定的偏好性, Hanaki 等<sup>[22]</sup> 将这种偏好性看做是企业的一种择优连接意识。为了体现这种偏好性, 本研究将每个在位企业  $i$  的度作为新企业  $j$  选择合作伙伴的重要依据, 并提出在位企业的度越大, 该企业的合作关系数量就越多, 进而意味着其具有越高的信誉和可信任度, 也就越值得新企业  $j$  与其建立合作关系。最后本研究提出在成长阶段的任一时刻  $t$ , 新加入企业  $j$  选取网络在位企业  $i$  的概率  $\Pi_{ij}(t)$  为

$$\Pi_{ij}(t) = \frac{k_i(t)}{\sum_i k_i(t)} \quad (13)$$

其中,  $k_i(t)$  为  $t$  时刻节点企业  $i$  的度,  $k_i(t)$  越大, 企业  $i$  被新企业  $j$  选择的概率就会越高。

当然, R&D 网络的规模并不会随时间推移而无限增加, 只有适度的规模才是实现研发资源集聚效应的关键, 即达到一定规模后 R&D 网络将进入调整阶段。在该阶段, R&D 网络将不会有新的企业加入, 即网络规模不会增加, 此时最主要的特征体现为在位企业之间是选择维持原有的合作研发(或各自独立研发)关系, 还是建立(或解除)合作研发关系, 其实质是在位企业之间不断相互选择和彼此试错的过程。于是本研究假设每经历一个演化周期, 就依据一定规则从网络中选取一对节点企业  $i$  和  $j$  来决定是否合作。为了研究的方便, Jackson 等<sup>[23]</sup> 提出从社会网络中随机选取两个节点来决定合作与否。然而这种选取规则并不适用于现实网络, 为此 Autant-Bernard 等<sup>[24]</sup> 提出应选取空间距离较近的两个企业来决定是否合作, 距离越近, 双方选择彼此进行合作的概率就越大。本研究认为如果网络连接关系的密集度越高, 选取出的节点对之间存在连接关系的概率会越高, 否则就越低。而且如果网络内两个企业间的空间距离和网络距离越小, 双方进行合作研发的收入会越高, 成本就越低, 进而双方选择彼此进行合作研发的概率就会越大。综上, 本研究提出在调整阶段的任一时刻  $t$ , 选取一对在位企业  $i$  和  $j$  的概率  $\Pi_{ij}(t)$  为

$$\Pi_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{\frac{1}{2} \sum_i k_i}{\frac{N(N-1)}{2}}, & \forall ij \in g, \\ \left( \frac{\alpha}{d_1(i,j)} + \frac{\beta}{d_2(i,j)} \right) \cdot \frac{N(N-1) - \sum_i k_i}{N(N-1)}, & \forall ij \notin g, \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $g_t$  为  $t$  时刻的 R&D 网络;  $N$  为网络在位企业的数量;  $\alpha$  和  $\beta$  为大于 0 的可调参数, 分别表示企业之间网络距离和空间距离的重要程度, 其值越大, 意味着这两类距离在选取节点对的过程中起到的作用就越重要, 即选择这两类距离越短的节点对的概率就会越高。

然而, 上面只是提出处于不同演化阶段的研发企业选择合作伙伴的规则, 双方最终能否建立或删除连接还要取决于自身的研发收益。在某一时刻  $t$  将企业  $i$  和  $j$  选出来之后, 根据上述研发决策过程决定是否保持原有的关系。若  $ij \in g$ , 当且仅当  $s_i(g-ij) \leq s_i(g)$  和  $s_j(g-ij) \leq s_j(g)$  同时成立, 双方仍将保持原有的合作研发关系, 其中任意一方在解除与对方的关系之后出现自身收益增加的情况, 则将取消该合作关系; 若  $ij \notin g$ , 当且仅当  $s_i(g+ij) \geq s_i(g)$  和  $s_j(g+ij) \geq s_j(g)$  同时成立, 且其中任意一方的研发收益为严格增加时, 双方才会建立起新的合作研发关系。上述研发决策过程都是假定每个企业均为理性决策者, 做出的研发决策都是理性和准确的。但在现实生活中, 每个企业做出的研发决策未必都是理性的。本研究引入决策误差因子  $\zeta, 0 < \zeta < 1$ , 双方企业将以概率  $\zeta$  去改变各自原先做出的理性决策, 从而使该演化模型更加符合实际情况。

### 5 结果分析和讨论

#### 5.1 仿真结果分析

为了便于对 R&D 网络的自组织演化过程进行仿真, 对上述理论模型进行简化。首先假设起始阶段的 R&D 网络企业数目  $N_0 = 6$ , 并呈现出以核心企业为中心的星型网络结构, 同时令外围企业之间以  $p = 25\%$  的概率建立合作关系; 为了研究主要参数  $\delta$  的变化对 R&D 网络自组织演化的影响, 令参数  $H_0 = 0, \alpha = \beta = 1$ ; 设定网络的可能最大规模  $N_{\max} = 5\,000$ , 并取

$h = 0.001$ ; 假设  $\omega_i = (\omega_{iA}, \omega_{iB})$  服从  $0 \sim 1$  的均匀分布, 即  $\omega_{iA} \sim U(0,1)$  和  $\omega_{iB} \sim U(0,1)$ 。最后, (12) 式可简化为

$$s_i(t) = \sqrt{m_{iA}(t) \cdot m_{iB}(t)} - 0.001 \sum_j d_2(i,j) \quad (15)$$

Jackson 等<sup>[21]</sup> 的研究结果证明, 当  $\zeta \rightarrow 0$  时, 网络的演化过程将收敛于唯一的稳定状态。为此, 本研究提出  $\zeta$  随时间周期  $T$  的推进而趋于零, 定义为

$$\zeta = \begin{cases} 0.05 & T < 500 \\ \frac{1}{T} & T \geq 500 \end{cases} \quad (16)$$

经过上述简化和设定, 本研究运用 MATLAB 7.0 对  $\delta = 0.50$  时的 R&D 网络自组织演化过程进行仿真, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 当  $T = 0$  时, 仅有 6 个研发企业聚集在有限区域内, 核心企业与所有外围企业存在直接关系, 外围企业之间的连接关系数量相对较少。进入成长阶段, 不断有新的企业加入其中, 网络在位企业的数量快速增加, 并在  $T = 1\,477$  时达到最大值  $N_{\max} = 94$ 。之后, R&D 网络进入调整阶段, 在此期间先后有 7 个研发企业由于经常不被选择而逐渐退出网络, 与此同时企业之间的连接关系数量逐渐增多, 并在  $T = 3\,200$  时达到稳定状态。为了更精确地描述处于不同阶段的 R&D 网络自组织演化特征, 本研究对平均度、聚集系数、平均路径长度和平均收益的变化情况进行仿真, 结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 当 R&D 网络处于成长阶段(即  $0 \sim 1\,477$  周期)时, 除平均路径长度之外, 其他 3 个统计指标均呈现出逐渐下降的趋势, 但下降幅度却逐渐减小。说明在此阶段, 随着新企业的不断加入, R&D 网络的规模不断增加, 但由于新加入企业与在位企业的联系较少, 网络的平均度不断降低, 形成小

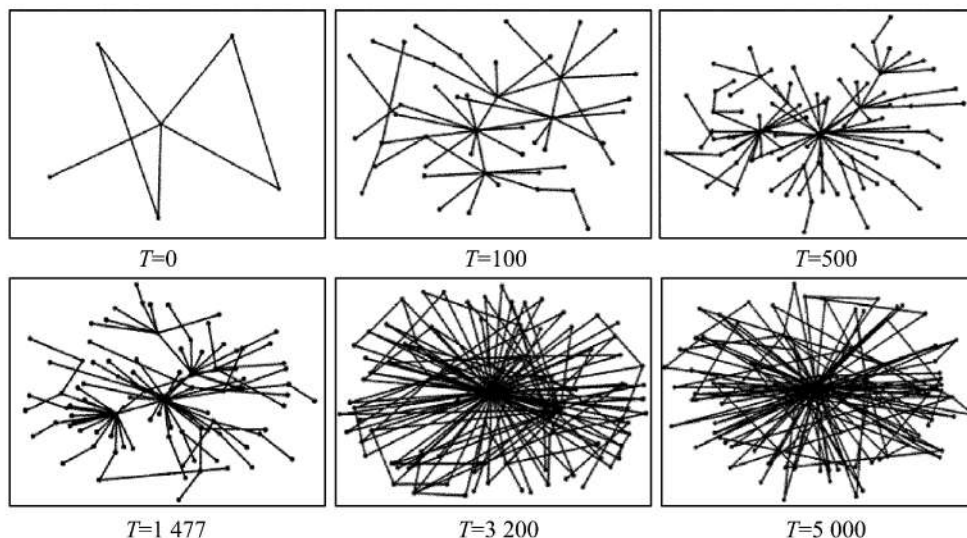


图3 R&D网络的自组织演化过程( $\delta = 0.50$ )

Figure 3 Self-organization Evolution Process of R&D Network ( $\delta = 0.50$ )



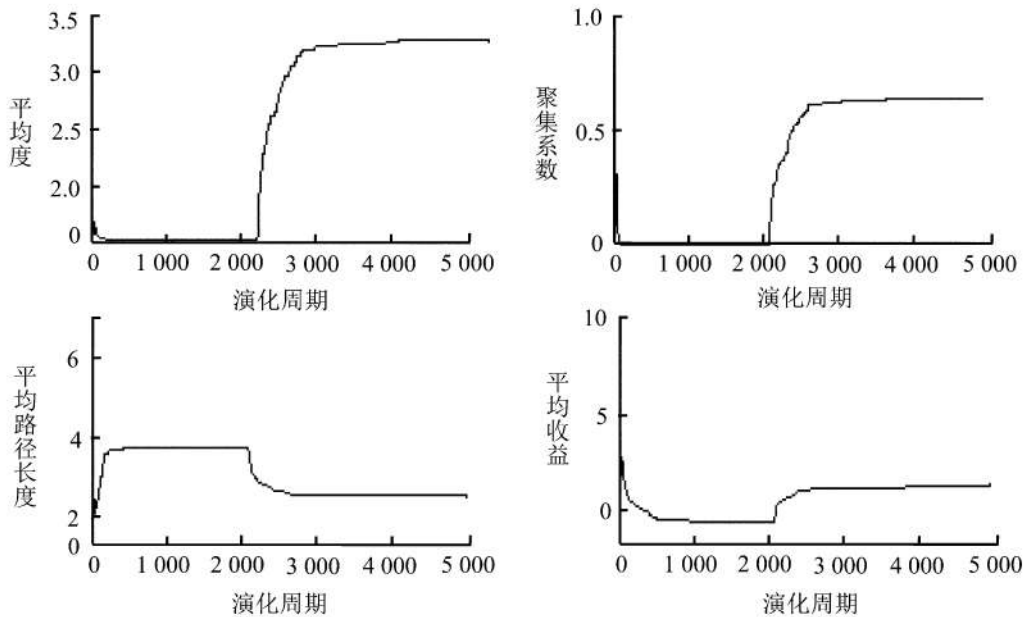


图4 R&amp;D网络各特征统计量的演化情况

Figure 4 Evolution Results of R&amp;D Network Indexes

团体的可能性也极小,这可以通过几乎为零的聚集系数看出。由于新加入企业之间往往缺乏信任,他们更容易与核心企业建立直接合作关系,以减少交流或合作的风险,而彼此之间的直接合作关系较少,也就导致平均路径长度呈现出逐渐增加的趋势。平均路径长度的增加在一定程度上说明网络内部研发资源整合效率下降,即企业间获取研发资源所付出的成本增加,因而网络的平均收益也就随之减小。

当R&D网络处于调整阶段(即1478~3200周期)时,除平均路径长度显著下降并逐渐趋于缓和之外,其余3个指标均明显增长并最终趋于稳定。说明在此阶段,随着现代信息和通讯技术的快速发展和日益完善,研发企业之间可以打破时间和地域的限制,最大限度地实现设备、人才等资源的互利共享,这为企业之间建立合作提供了技术保障。同时经过前一阶段的间接合作和相互了解,外围企业之间也建立起一定的信任基础。因此,网络内在位企业之间的连接数量有了显著增加,从而导致网络的平均度显著增加,进而导致平均路径长度随之减小,同时网络内部出现小团体的可能性增加,这从不断增加的聚集系数也可以看出。平均路径长度的减小进一步说明研发企业获取资源的成本不断减少,网络的平均收益也就随之增加。运行到3200个周期以后,4个统计指标不再发生显著变化,说明R&D网络的自组织演化最终可以通过企业之间的互动而达到稳定状态。

同时还发现,当R&D网络处于稳定状态时,其度分布满足幂律分布规律,说明该网络具有明显的无标度和集聚结构,即 $P(k)$ 随节点度 $k$ 的增大基本呈指数形式衰减,如图5所示。

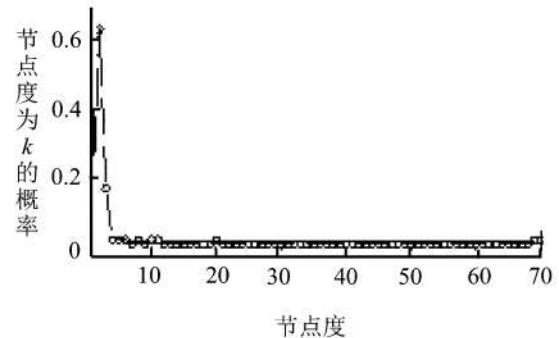


图5 R&amp;D网络达到稳定状态时的度分布

Figure 5 Degree Distribution of Stable R&amp;D Network

这说明在R&D网络内部,由于研发企业之间的相互影响而产生所谓的共同意识。共同意识的存在使那些最初合作关系较多的企业随着时间的推移逐渐成为其他企业期望合作的对象,从而导致R&D网络在演化过程中最终涌现出少数几个明星节点,它们能够获得大量的合作机会,成为集散节点<sup>[22]</sup>。而且,这少数几个明星企业由于拥有相对于外围企业更丰富的研发信息和更高的声望,导致那些外围企业更倾向于通过核心企业的桥梁作用而建立间接的合作关系,而外围企业彼此之间的直接合作关系相对较少。本研究通过仿真得到的结论从Hanaki等<sup>[22]</sup>、Roediger-Schluga等<sup>[25]</sup>和Barber等<sup>[26]</sup>的研究成果中同样可以得到支持。

## 5.2 知识溢出效率 $\delta$ 对R&D网络自组织演化的影响

知识溢出效率 $\delta$ 作为R&D网络自组织演化模型中的重要参数,表示研发企业之间知识传递的衰减

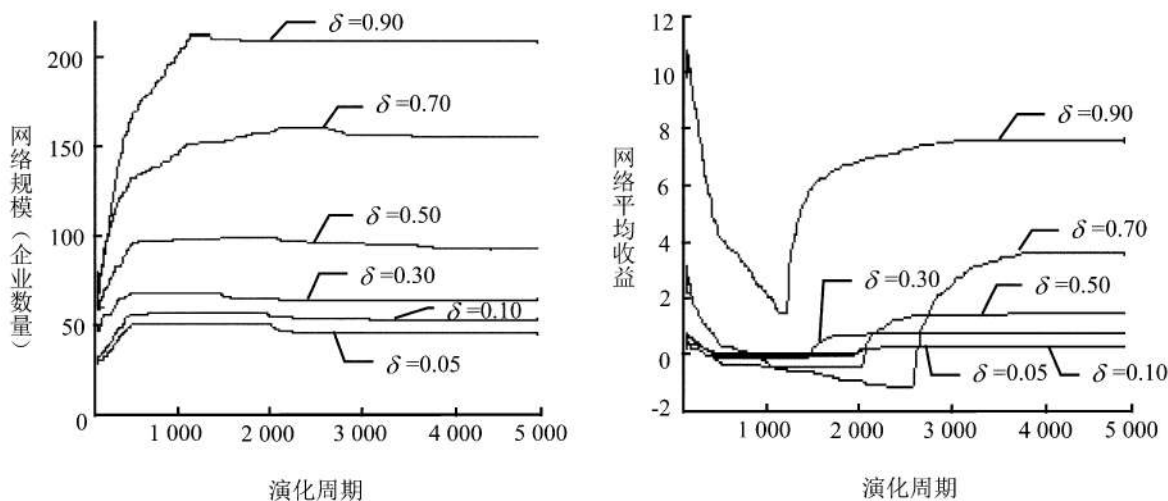


图6 知识溢出效率对网络规模、平均收益的影响

Figure 6 Effect of Knowledge Spillover Efficiency on the Network's Scale and Average Surplus

速度,其值越大,知识衰减的速度越慢,知识传递和扩散的效率也就越高。研究  $\delta$  如何影响 R&D 网络的自组织演化过程,对于政府机构正确制定宏观政策以保持 R&D 网络的持续健康发展具有一定的参考价值。本研究分别模拟当  $\delta = 0.05, 0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90$  时,R&D 网络各个特征统计量的演化情况,具体见图 6 所示。通过仿真发现,知识溢出效率  $\delta$  与平均度、聚集系数、平均路径长度不存在规律性的相关关系(陷于篇幅不再列出),而与网络规模和平均收益具有显著关系。

从图 6 可以看出,无论  $\delta$  取何值,R&D 网络企业数量和平均收益(即网络利用效率)均呈现大致相同的演化趋势,而且在任意演化周期,两者基本上随  $\delta$  值的增加而增加。说明知识溢出效率的提高,可以进一步激励研发企业参与合作的热情,从而吸引越来越多的新企业加入到 R&D 网络中,因此网络规模和利用效率呈现出增加的趋势,这对于政府制定宏观政策具有一定的启示作用。如果政府的目标是增加创新集聚区的整体福利水平和规模,就应积极提高企业间的知识溢出效率,即制定相应的优惠政策以及提供完善的通讯和交通设施来减少企业传递知识的成本,从而为企业间的合作提供便利条件。但是,随着知识传递效率的增加,研发企业为了获取所需资源而付出沟通和交流的成本也会越来越低,这意味着企业发生不诚信行为的机会成本会进一步降低,从而增加了某些企业窃取核心技术、传递虚假信息、中途违约等不诚信行为发生的可能性。为此,政府应充分利用核心企业在网络中的集散作用,使其充当监督角色,建立网络内企业的信用收集和反馈机制,提高不诚信行为的机会成本,这些有助于集群信用机制的建立<sup>[20]</sup>,从而保证 R&D 网络的持续健康发展。

### 6 模型验证

国内外不乏基于核心企业发展起来的 R&D 网络,以诺基亚公司为核心建立起来的 R&D 网络最具代表性。诺基亚公司的 R&D 网络是基于其在网络中的主导优势、核心能力和研发战略不断发展壮大的,其演化过程共经历了两个重要的发展阶段。第一个阶段在 1997 年~1998 年,诺基亚先后与 11 个研发企业缔结为 R&D 联盟,如图 7 所示<sup>[27]</sup>;第二个阶段在 2001 年~2002 年,随着第三代信息技术的快速发展,诺基亚公司开始意识到通过网络技术将 R&D 联盟扩展成为更大规模的网络更为重要,于是基于第三代移动交流服务技术研发形成了更大规模的 R&D 网络,如图 8 所示<sup>[27]</sup>。

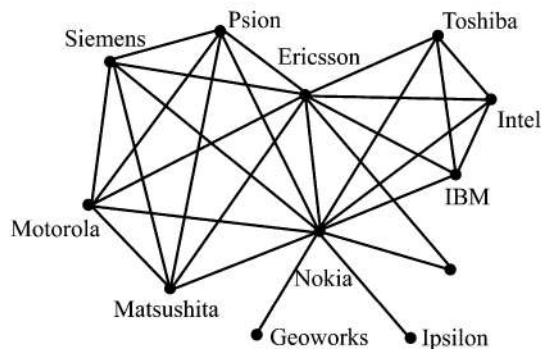


图7 1997年至1998年诺基亚 R&D 网络

Figure 7 Nokia's R&D Network in 1997-1998

通过对比图 7、图 8 和图 3 的仿真过程发现,诺基亚的 R&D 网络同样经历了从小到大、从简单到复杂的发展过程,这种发展过程并不需要在外部指令下进行,而是由研发企业基于自身战略、技术实力和外部环境变化自发进行的,其具有复杂适应系统的



自组织演化特征,从而在一定程度上验证了理论模型的合理性。

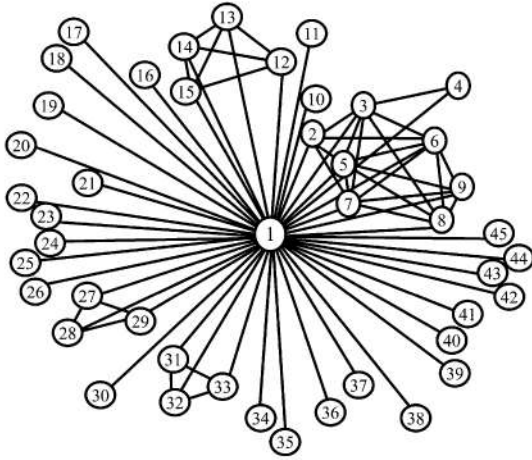


图8 2001年至2002年间的诺基亚R&D网络  
Figure 8 Nokia's R&D Network in 2001-2002

图8中,1为Nokia,2为Siemens,3为Sony-Ericsson;4为Au-Systems;5为Motorola;6为Logica;7为Cmg;8为Converse;9为Ericsson;10为Sony;11为Supedo;12为Ptic;13为Catt;14为LG-Electronic;15为Texas-Instr;16为Wfi;17为Shanghai-Allicance;18为Zhejiang-Univ;19为Telefonica;20为Tieto-Enator;21为Telenor;22为Sci-Systems;23为Visa;24为Nordea;25为Primatel;26为Ntt-Docomo;27为Radiolinja;28为Luttokunta;29为IBM;30为Marconi;31为Sampo;32为3I;33为Accenture;34为Iss;35为Intel;36为Redback;37为Macromedia;38为Elisa;39为Checkpoint;40为Computer-Assoc;41为Kone;42为Intertrst;43为H-P;44为Realnetworks;45为724-Solutions。

同时,为了更准确地对理论模型的仿真结果进行检验,本研究对2001年至2002年形成的诺基亚R&D网络的度分布进行统计和计算,并将其与理论模型的度分布(图5)进行对比,结果如图9所示。

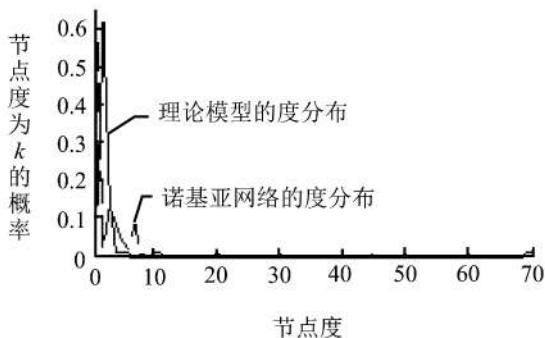


图9 理论模型与实际网络的度分布对比  
Figure 9 Contrast of Degree Distribution of the Theoretical Model and Practical Network

经过对比发现,诺基亚的R&D网络与理论模型的仿真结果大致相似,同样具有明显的无标度和集聚特征,即形成以诺基亚为核心企业(明星节点或集散节点)、大多数外围企业彼此间直接合作关系相对较少的网络。尽管理论模型与现实网络在节点度为1、2和7上的分布概率之间存在一定的差异,对验证结果产生一定的影响,但从整体趋势和规律看,诺基亚网络基本上满足随节点度 $k$ 的增大呈指数形式衰减的幂律分布规律。因此,本研究理论模型的演化结果与现实的R&D网络基本吻合,在一定程度上验证了理论模型的正确性。

## 7 结论

本研究从复杂适应系统理论出发,借鉴复杂网络理论研究成果,建立R&D网络的自组织演化模型,运用仿真与案例相结合的方法,对其自组织演化过程进行深入分析。研究表明,度分布、聚集系数、平均路径长度和平均收益系数等4个反映R&D网络整体演化特征的统计指标在经历一段时间的变化后基本保持不变。这说明R&D网络的自组织演化过程在微观企业追求自身收益最大化的作用下最终可以达到一种稳定状态,此时进出网络的企业数量以及彼此之间形成的合作关系达到了一种动态平衡。通过仿真结果还发现,达到稳定状态的R&D网络的度分布满足幂律分布规律,整体网络呈现出明显的无标度和集聚特征。这说明研发企业在选择合作伙伴时具有一定的偏好性或择优连接意识,使少数几个企业逐渐成为网络中的集散节点,即所谓的明星节点,而外围企业之间的直接合作关系数量则相对较少,从而导致R&D网络企业之间具有显著的异质性。

通过研究知识溢出效率对R&D网络自组织演化的影响关系发现,知识溢出效率与网络的平均度、聚集系数、平均路径长度这3个统计指标不存在规律性的相关关系,而对网络规模和利用效率具有显著影响,两个指标都随着知识溢出效率的增大而增加,这对政府机构正确制定宏观政策以提高R&D网络的整体福利水平具有一定的启示。但同时也应意识到,随着知识传递效率的增加,研发企业之间发生窃取核心技术、传递虚假信息、中途违约等不诚信行为的机会成本将进一步降低,发生的可能性将进一步增加,这也给R&D网络的持续健康发展提出了挑战。最后将理论模型与诺基亚网络进行对比,发现模型的仿真结果与实际网络基本吻合,从而在一定程度上验证了理论模型的正确性。

本研究运用复杂适应系统理论和复杂网络的研究成果,对R&D网络的自组织演化机制进行研究,从而将微观企业的自主行为与宏观网络的整体演化有机联系。但所建模型尚是一种通用模型,未来可针对具体类型的R&D网络将企业间的连接强度视为连续变量,以使模型更加符合现实情况。

## 参考文献:

- [1] Dittrich K, Duysters G, De Man A P. Strategic repositioning by means of alliance networks: The case of IBM [J]. *Research Policy*, 2007, 36(10): 1496-1511.
- [2] Todtling F. Innovation networks, collective learning, and industrial policy in regions of Europe [J]. *European Planning Studies*, 1999, 7(6): 693-697.
- [3] 王文亮, 刘岩. 企业研发网络的特征和结构模式分析 [J]. *技术经济*, 2010, 29(10): 24-27.  
Wang Wenliang, Liu Yan. Analysis on characteristics and structural pattern of enterprise's R&D network [J]. *Technology Economics*, 2010, 29(10): 24-27. (in Chinese)
- [4] Von Zedtwitz M, Gassmann O. Market versus technology drive in R&D internationalization: Four different patterns of managing research and development [J]. *Research Policy*, 2002, 31(4): 569-588.
- [5] Bartlett C A, Doz Y, Hedlund G, Ghoshal S. *Managing the global firms* [M]. London: Routledge, 1990: 215-255.
- [6] 曾德明, 朱丹, 周青, 方放. 高技术企业协作 R&D 网络的特征、组织模式及其竞争优势研究 [J]. *科学管理研究*, 2006, 24(4): 103-106.  
Zeng Deming, Zhu Dan, Zhou Qing, Fang Fang. The characteristics, organization mode and competition advantage of the hi-tech enterprise cooperation R&D network [J]. *Scientific Management Research*, 2006, 24(4): 103-106. (in Chinese)
- [7] d'Aspremont C, Jacquemin A. Cooperative and non-cooperative R&D in duopoly with spillovers [J]. *American Economic Review*, 1988, 78(5): 1133-1137.
- [8] Suzumura K. Cooperative and noncooperative R&D in an oligopoly with spillovers [J]. *American Economic Review*, 1992, 82(5): 1307-1320.
- [9] Bala V, Goyal S. A noncooperative model of network formation [J]. *Econometrica*, 2000, 68(5): 1181-1229.
- [10] Kranton R E, Minehart D F. A theory of buyer-seller networks [J]. *American Economic Review*, 2001, 91(3): 485-508.
- [11] Goyal S, Moraga-González J L. R&D networks [J]. *Rand Journal of Economics*, 2001, 32(4): 686-707.
- [12] Goyal S, Moraga-González J L, Konoualov A. Hybrid R&D [J]. *Journal of the European Economic Association*, 2008, 6(6): 1309-1338.
- [13] 周青, 曾德明, 朱丹, 方放. 企业 R&D 网络化的动态博弈模型 [J]. *预测*, 2005, 24(3): 61-65.  
Zhou Qing, Zeng Deming, Zhu Dan, Fang Fang. The dynamic game model of firms' R&D network [J]. *Forecasting*, 2005, 24(3): 61-65. (in Chinese)
- [14] 周青, 曾德明, 朱丹. 企业 R&D 网络化博弈与投资决策分析 [J]. *管理工程学报*, 2008, 22(1): 24-28.
- [15] 赵红梅, 王宏起. 社会网络视角下 R&D 联盟网络的形成路径研究 [J]. *科技进步与对策*, 2010, 27(20): 1-5.  
Zhao Hongmei, Wang Hongqi. The pathway of forming R&D alliance network based on the perspective of social network [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2010, 27(20): 1-5. (in Chinese)
- [16] 赵红梅, 王宏起. 社会网络视角下 R&D 联盟网络效应形成机理研究 [J]. *科学学与科学技术管理*, 2010(8): 22-27.  
Zhao Hongmei, Wang Hongqi. Research on forming mechanism of R&D alliance network effects based on the perspective of social network [J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2010(8): 22-27. (in Chinese)
- [17] Allen W D. Social networks and self-employment [J]. *Journal of Socio-Economics*, 2000, 29(5): 487-501.
- [18] 王珊珊, 田金信, 唐宇. 基于 R&D 联盟发展演化特点的管理体系优化研究 [J]. *科学学与科学技术管理*, 2010(3): 56-60.  
Wang Shanshan, Tian Jinxin, Tang Yu. Research on the management system optimization based on development and evolution characteristics of R&D alliance [J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2010(3): 56-60. (in Chinese)
- [19] 田钢, 张永安, 兰卫国. 基于刺激-反应模型的集群创新网络形成机理研究 [J]. *管理评论*, 2009, 21(7): 49-55.  
Tian Gang, Zhang Yong'an, Lan Weiguo. Study on evolving principle of industrial clusters innovation network based on stimulus-response model [J]. *Management Review*, 2009, 21(7): 49-55. (in Chinese)
- [20] 谭劲松, 何铮. 集群自组织的复杂网络仿真研究 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 1-14.  
Tan Jinsong, He Zheng. Self-organization of industrial cluster: A computer simulation from complex network perspective [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 1-14. (in Chinese)
- [21] Jackson M O, Watts A. The evolution of social and economic networks [J]. *Journal of Economic Theory*, 2002, 106(2): 265-295.
- [22] Hanaki N, Nakajima R, Ogura Y. The dynamics of R&D network in the IT industry [J]. *Research Policy*, 2010, 39(3): 386-399.
- [23] Jackson M O, Rogers B W. Meeting strangers and

- friends of friends: How random are social networks? [J]. *American Economic Review*, 2007, 97(3): 890–915.
- [24] Autant-Bernard C, Mairesse J, Massard N. Spatial knowledge diffusion through collaborative networks [J]. *Papers in Regional Science*, 2007, 86(3): 341–350.
- [25] Roediger-Schluga T, Barber M J. R&D collaboration networks in the European framework programmes: Data processing, network construction and selected results [J]. *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, 2008, 4(3/4): 321–347.
- [26] Barber M J, Krueger A, Krueger T, Roediger-Schluga T. Network of European Union-funded collaborative research and development projects [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(3): 1–13.
- [27] Dittrich K, Duysters G. Networking as a means to strategy change: The case of open innovation in mobile telephony [J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2007, 24(6): 510–521.

## Research on the Model and Simulation for the Self-organization Evolution of R&D Network

Zhang Yanlu, Yang Naiding, Guo Xiao

School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract:** From the perspective of complex adaptive system theory, this paper studies the evolution of R&D network, which is regarded as the self-organization process. The paper establishes the analytical framework of R&D network's self-organization evolution from three dimensions including division of macro phases, behavior rules of micro enterprises and characteristic statistics of network. Based on the complex network theory, the paper establishes the theoretical model of R&D network's self-organization evolution, and then reveals the evolutionary rules, influence of knowledge spillover efficiency on characteristic statistics of network by numerical simulation method. The results show: the self-organization evolution of R&D network will reach the stable state eventually; enterprises have the consciousness of "preference attachment", which makes R&D network show the characteristics of scale-free and convergence; knowledge spillover efficiency has a significant impact on network's scale and utilization efficiency, which provides a theoretical base for government's making macro policies. Finally, we confirm the theoretical model by using Nokia's R&D network, and find that the model and practical network are similar basically, which illustrates the correctness of the model.

**Keywords:** R&D network; self-organization evolution; complex adaptive system; complex network; simulation

**Received Date:** September 15<sup>th</sup>, 2011      **Accepted Date:** March 3<sup>rd</sup>, 2012

**Funded Project:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(70972126) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20106102110042)

**Biography:** Zhang Yanlu, a Shandong Weifang native(1984–), is a Ph. D. candidate in the School of Management at Northwestern Polytechnical University. His research interests include management system engineering and project management, etc. E-mail: zhangyanlu0789@163.com □