

# 多层网络视角下新兴技术跨界融合机理与实证研究

曹兴<sup>1,2</sup>, 许羿<sup>1,3</sup>, 赵倩可<sup>1</sup>, 李小娟<sup>3</sup>

(1. 中南大学商学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南第一师范学院, 湖南 长沙 410205;

3. 湖南财政经济学院, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 新兴技术具有技术和市场的不确定性特征, 创新主体通过主动或被动的方式交换各种资源, 推动了技术间的跨界融合和企业间的跨界合作。构建新兴技术跨界融合的多层网络分析模型, 运用指数随机图模型, 对新兴技术跨界融合机理进行跨层次实证研究。研究表明: 技术多样性与邻近性对企业跨界合作具有阻碍作用, 技术异质性促进企业跨界合作; 关系强度与关系广度对技术跨界融合具有促进作用, 关系依赖性限制网络内部技术与外部技术的跨界融合。

**关键词:** 新兴技术; 跨界融合; 跨界合作; 多层网络

中图分类号: F273.1

文献标识码: A

文章编号: 4005-0566(2022)12-0102-10

## Mechanism and empirical study of cross-border convergence of emerging technologies from the perspective of multi-layer networks

CAO Xing<sup>1,2</sup>, XU Yi<sup>1,3</sup>, ZHAO Qianke<sup>1</sup>, LI Xiaojuan<sup>3</sup>

(1. Business School of Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan First Normal University, Changsha 410205, China;

3. Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China)

**Abstract:** Emerging technologies are characterized by the uncertainty of technology and market. Innovation subjects exchange various resources in an active or passive way, which promotes the cross-border integration among technologies and cross-border cooperation among enterprises. In this paper, a multi-layer network analysis model of emerging technology cross-border fusion is constructed, and the exponential random graph model is used to conduct cross-level empirical research on the mechanism of emerging technology cross-border fusion. The results show that technology diversity and proximity hinder cross-border cooperation, and technology heterogeneity promotes cross-border cooperation. The strength and breadth of relationships promote the cross-boundary integration of technologies, and the relationship dependence limits the cross-boundary integration of internal and external technologies.

**Key words:** emerging technology; cross-border integration; cross-border cooperation; multilayer network

收稿日期: 2022-08-31 修回日期: 2022-10-29

**基金项目:** 国家社会科学基金重点项目“数字技术赋能制造业跨界融合生产性服务业实现高质量发展研究”(22AJY024); 国家自然科学基金项目“差异化情境下跨组织知识共享行为及其动态激励机制研究”(20BGL126)。

**作者简介:** 曹兴(1964—), 男, 四川大竹人, 管理学博士, 中南大学商学院教授、博士生导师, 研究方向为技术创新、技术管理、知识管理。通信作者: 曹兴。

对新兴技术跨界融合的分析有助于探究其跨界融合的机理,提高企业技术融合的成功率,推动企业合作和快速发展。国内外学者在独立研究技术间的跨界融合和企业间的跨界合作的过程中,已经意识到企业跨界合作与技术跨界融合存在着紧密的关系,企业间合作的强度、广度及依赖性影响技术融合<sup>[1-2]</sup>。同时,技术多样性、邻近性、异质性等特征影响了企业间合作关系的建立<sup>[3-4]</sup>。但是对于技术跨界融合与企业跨界合作的互动具体如何影响新兴技术跨界融合尚未得到研究证实,新兴技术跨界融合的过程和机理有待进一步探索。多层网络为研究新兴技术跨界融合提供了新的视角,新兴技术跨界融合不仅通过整合多种技术来实现,还要考虑多个主体与多个层次的动态关系。将新兴技术跨界融合嵌于复杂交互的创新网络中,其网络关系呈现出多重性,更能全面解释新兴技术跨界融合的过程与影响。

综上所述,本文基于多层网络视角,从企业的技术特征和关系特征出发,研究其对企业跨界合作和技术跨界融合的影响。以虚拟现实技术为研究对象,构建 IPC 共现网络、专利权人共现网络和 IPC - 专利权人隶属网络,运用 Gephi 软件对网络特征进行分析,采用指数随机图模型(Exponential Random Graph Models, ERGM)进行跨层次的实证研究,探究多层网络下新兴技术跨界融合机理,理论上突破单层网络研究的局限性,有助于深入理解技术跨界融合与企业跨界合作之间的关系与作用。

## 一、理论分析与研究假设

新兴技术跨界融合表现为技术间的跨界融合和企业间的跨界合作,通过技术与企业间的多层次交互作用,打破了原有技术与组织的壁垒和鸿沟。跨界融合行为实质上体现了不同领域内特定知识体系的跨界分享与互动,知识的共性与异质性等特征,对技术间互动效果产生影响,进而影响企业跨界合作的意愿与程度。同时,技术发展依附于企业,企业作为技术融合的载体,其合作的强度与广度等关系特征将影响技术与知识转移的方式,从而对技术间的跨界融合产生影响。

### (一)企业的技术特征对企业跨界合作的影响

技术多样性是指企业在不同领域的技术分布多样性程度,体现了在多个技术领域的知识积累程度,反映企业自身的创新能力<sup>[5]</sup>。多样性的技术资源可以提高企业快速吸收外部技术的能力,促进企业形成合作关系,增强企业合作效率。梁杰等<sup>[6]</sup>研究表明企业技术多样性有利于解决联盟企业间的技术不一致,增强联盟稳定,提高创新效率。

新兴技术企业通过技术跨界融合的方式,加快了技术发展,形成全新的技术发展轨道。由于技术自主研发的成本高、收益不确定,企业需要吸引其他企业进行合作研发来规避<sup>[7]</sup>。技术多样性拓展了企业的技术基础,更容易研发新技术和新产品;多样性技术资源增加了企业获得新技术资源的可能性,增强企业对外部知识溢出的吸收和利用,更倾向和其他企业进行研发合作;技术跨界能力较弱的企业迫于自身的需求,也会寻求与较强的企业进行跨界合作<sup>[8]</sup>。

综上所述,本文提出假设 H1:技术多样性对企业跨界合作具有促进作用。

技术邻近高的容易造成企业间知识基础高度重叠,引发知识锁定,不利于进一步创新。Guan 等<sup>[9]</sup>验证了技术邻近高抑制企业进行重组创新。刘凤朝等<sup>[10]</sup>分析技术邻近性对新能源汽车企业合作创新的影响,结果表明技术邻近性较高的企业因区域内客户和竞争对手集中,不愿意和其他企业合作。Chen 等<sup>[11]</sup>发现技术距离过短,导致创新主体间知识互补性下降,企业进行合作的趋势降低,合作创新动力不足,抑制合作创新绩效。王宛秋等<sup>[12]</sup>提出处于成熟期的企业,倾向选择与自身技术相似程度低的企业进行技术并购来提升创新绩效。

当创新主体的技术邻近性较高时,意味着创新主体间的知识基础接近程度高,企业的技术跨界搜索会受到限制,减少了企业学习和探索创新的机会,知识转移较难发生,不利于知识的重组和价值的创造,同时可能会出现认知过载,降低新技术和新资源的数量。此外,技术邻近性往往意味着拥有相似的产品和重叠的产品市场,不利于企

业提高市场竞争地位,企业会倾向于选择不进行跨界合作。

综上所述,本文提出假设 H2:技术邻近性对企业跨界合作具有阻碍作用。

技术异质性是指企业间技术种类和数量上的差异化程度<sup>[13]</sup>,Sytych 等<sup>[14]</sup>研究了群体间合作关系的建立和解散,分析得出技术异质性会促进群内成员跨越技术群体边界获取知识,突破原资源禀赋和旧合作惯例的束缚。刘刚等<sup>[15]</sup>指出异质性的技术资源能有效增加企业的知识基础,促进资源协同效应的发挥,提高企业的学习能力。李莉等<sup>[16]</sup>通过构建新能源产业主要技术领域的专利引用网络,分析技术异质性对网络耦合的影响,结果表明技术异质性促进技术主体间进行关系耦合。

企业开展合作动机就是从伙伴企业获得知识和技术<sup>[17]</sup>,由于资源的有限性,企业会将有限的资源用到寻求异质性知识及其知识的创造。为规避技术创新的路径依赖,以及自身技术资源的匮乏,企业往往选择技术异质性高的企业进行跨界合作,获取和转移异质性资源,拓展自身的技术领域范围,实现技术资源有效融合,提高企业在新产品开发和技术创新的效率,从而获得相对竞争优势。

综上所述,本文提出假设 H3:技术异质性对企业跨界合作具有促进作用。

## (二)企业的关系特征对技术跨界融合的影响

关系强度体现了企业间的合作频率,较高的关系强度表明企业间的合作关系较稳定<sup>[18]</sup>。Zheng 等<sup>[19]</sup>提出企业合作伙伴之间的联盟关系有利于共同分担技术研发活动的风险和成本,促进新技术的研发。Poppo 等<sup>[20]</sup>认为企业在合作下易形成相互信任关系,促进企业间的技术资源投入,推动合作企业共同实现技术创新。强网络关系下企业间的信任程度更高,有利于知识在企业间的流动,降低机会主义威胁,促进创新主体间的资源共享,提高企业间交互的效率,进而提升技术创新绩效<sup>[21-22]</sup>。

随着企业间关系强度的提高,企业间的合作更频繁,有利于企业间形成良好的关系资本,企业间的互惠意识增强<sup>[23]</sup>。一方面,在合作交流中,由

于企业间信任程度较强,其投入的技术资源的数量与质量会有所提升,促进了企业获取技术跨界融合所需的异质性知识,同时通过整合不同技术领域的知识,有利于发现技术跨界融合的新机会,进而增强技术跨界融合的可能性;另一方面,企业间合作关系的增强,降低了技术跨界融合带来的风险与成本,企业合作关系紧密,信任程度较强,合作中所发生的冲突与矛盾会减少,不仅共同分担了技术创新产生的成本,而且通过关系纽带促进技术跨界融合的顺利进行,进一步减少了因创新主体之间的矛盾所造成的风险。

综上所述,本文提出假设 H4:关系强度对技术跨界融合具有促进作用。

企业的关系广度加速企业获得技术创新所需的信息和资源,有效补充自身知识储备,并将其运用到技术跨界融合当中。Gnyawali 等<sup>[24]</sup>分析合作网络的结构嵌入和关系嵌入对企业间竞争的影响,指出企业合作的数量越多,企业的知识基础就越丰富,提高了企业吸收外部知识的速率。王建平等<sup>[25]</sup>研究表明网络关系的多样性为企业提供了更多的异质性资源,是技术融合的基础。McKelvey<sup>[26]</sup>提出企业与更多类型的高校和科研机构合作,有助于提高企业自身科研人员的技术水平,促进企业进行技术创新。邹思明等<sup>[27]</sup>认为广泛的网络关系有利于联合技术领域的合作伙伴建立。

企业的关系广度越大,技术跨界融合越有可能实现。一方面,企业合作范围越宽,从合作伙伴中获取的技术创新、企业创新经验越多,有助于提升企业内部科研人员的科学素养,调动科研人员的创新积极性,为进行技术跨界融合奠定了重要基础;另一方面,直接合作伙伴的数量越多,接触和获取异质性资源的可能性越大,由合作伙伴提供的异质性资源促进了企业间的交流,有利于企业迅速捕获前沿的科学知识,从而迅速识别、吸收和利用知识,促进技术的渗透,从而实现技术跨界融合。

综上所述,本文提出假设 H5:关系广度对技术跨界融合具有促进作用。

在创新网络内部,随着技术知识实现转移和

共享,企业也在频繁合作中形成关系依赖性<sup>[20]</sup>,倾向于在合作企业间获取相应的知识和技术支持,对新知识的流入有一定的阻碍,过度嵌入的网络关系可能会使企业失去网络外部优秀的合作伙伴。邓渝<sup>[28]</sup>分析联盟伙伴选择导向对企业技术创新的作用机制,指出关系导向伙伴选择所带来的冗余的关系路径,导致企业获得重复的资源和信息。从战略导向视角出发,认为战略联盟企业间的关系依赖性,导致联盟内部形成知识刚性,阻碍联盟成员对外部异质性知识的获取<sup>[29]</sup>,并且企业间的关系依赖会使企业与外部信息隔绝,不利于企业获取新的、异质性的信息,阻碍企业进行技术创新<sup>[30]</sup>。

企业在创新网络的关系依赖性,使得企业通常选择与网络内的企业会进行知识与技术的交流、吸收,很少与网络外部的企业进行技术跨界融合。一方面,创新网络内部的企业往往具有相同的战略或者理念,企业间信任较强。如果在现有网络中能获取所需的技术,就无须选择在已有网络外的技术。另一方面,关系依赖性限制了创新网络的边界,阻碍企业对网络外部技术的获取,企业技术在和网络外部技术进行跨界融合时,对外部技术不了解,使得技术跨界融合风险较高。原有网络内的企业不断进行知识和技术的互动,就会形成一个紧密的关系,降低与原网络之外的技术进行跨界融合。

综上所述,本文提出假设 H6:关系依赖性对网络内部技术与外部技术的跨界融合有阻碍作用。

## 二、模型构建

ERGM 是研究网络结构的统计模型,综合考虑了网络内部结构与外生节点属性对网络形成的影响<sup>[31]</sup>。ERGM 模型侧重于单层网络的分析,建立在网络间相互独立的基础上,忽略了不同层级网络之间的依赖作用,无法探索多层网络间的交互影响。

多层指数随机图模型(Multilevel Exponential Random Graph Models, MERGM),适用于研究多层网络之间的互动关系,弥补了 ERGM 侧重于研究单层网络的不足。MERGM 在 ERGM 的公式基础上进行了扩展<sup>[32]</sup>,可用于模拟两个单层网络和一个二分网络之间的交互影响。图 1 展示了所研究

的多层网络与 MERGM 模型中 3 个不同网络的对应关系(A,B 和 X),A 层代表技术跨界网络,其中圆点表示单个技术,圆点间连线表示技术间的跨界融合关系;B 层代表企业跨界网络,其中方块表示单个企业,方块间连线表示企业间的跨界合作关系;X 层表示技术—企业隶属二分网络,表示为两个单层网络间的连线。

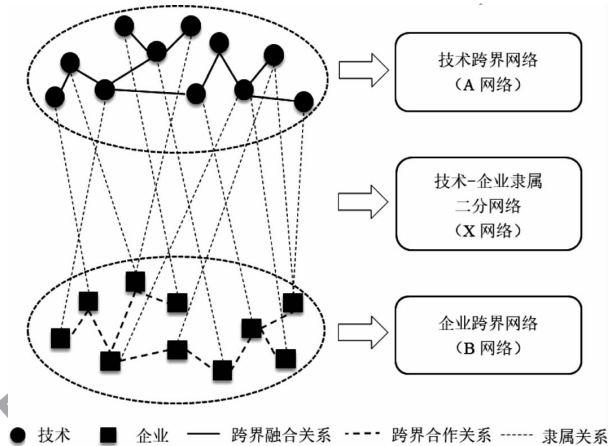


图 1 新兴技术跨界融合多层网络

基于本文假设,采用的 MERGM 概率公式:

$$Pr(A = a, X = x, B = b) = \frac{1}{k(\theta)} \exp \sum_q \{ \theta_q z_q(a) + \theta_q z_q(b) + \theta_q z_q(a, x) + \theta_q z_q(b, x) + \theta_q z_q(a, x, b) \}$$

式中,  $z_q(a)$  和  $z_q(b)$  表示单层网络配置的网络统计信息;  $z_q(a, x)$  和  $z_q(b, x)$  是两组同时包含单层网络和二分网络配置的网络统计信息;  $z_q(a, x, b)$  是多层网络配置的网络统计信息;  $k(\theta)$  是一个常量,用来确保所有网络的概率之和为 1;  $\theta_q$  是与网络统计量(  $z_q(a)$ 、 $z_q(b)$ 、 $z_q(a, x)$ 、 $z_q(b, x)$ 、 $z_q(a, x, b)$  )相关的参数。

在技术跨界网络、企业跨界网络和技术—企业隶属二分网络上,根据企业的技术特征与跨界合作,以及企业的关系特征与技术跨界融合,选择单层网络与二分网络中存在的网络结构模式,以及多层网络中与假设相对应的网络模式、节点属性模式。其中,节点属性测量如表 1 所示,单层网络与二分网络中的网络模式选择如表 2 所示,多层网络中的网络模式选择如表 3 所示。

表 1 节点属性测量

节点属性	定义
关系强度	反映企业与其合作伙伴之间的紧密程度。参考胡欣悦等 <sup>[33]</sup> 以两个网络节点共同参与合作专利申请的次数表示企业间合作关系强度。公式表示为： $qd_{mn} = \sum_{t_0}^{t_1} h_{mnt}$ ，其中 $h_{mnt}$ 表示 $m, n$ 两个不同企业在 $t$ 年的合作专利申请次数。 $t_0 \sim t_1$ 表示时间范围
关系广度	反映企业与外部联系的广泛性程度。参考曾德明等(2022)以网络中单个节点直接合作伙伴的数量之和表示企业的合作关系广度。公式表示为： $gd_{ii} = \sum_{j=0}^i l_{ij}$ ，其中 $l_{ij}$ 表示企业 $i$ 在 $t$ 年的直接合作伙伴数量。 $t_0 \sim t_1$ 表示时间范围

表 2 单层网络与二分网络包含的网络模式

模式	拓扑结构	效应	模式	拓扑结构	效应
1. 单层网络中存在的网络结构特征(A 网络模型、B 网络模型)					
ASA		扩张性	ASB		扩张性
ATA		传递性	ATB		传递性
2. 二分网络中存在的网络结构特征(X 网络模型)					
XASA		连通性	XASB		连通性

表 3 多层网络包含的网络模式

模式	拓扑结构	研究假设
1. 企业的技术特征影响企业跨界合作(B&X 网络模型)		
StarAXAB		H1: 技术多样性对企业跨界合作具有促进作用
TriangleXBX		H2: 技术邻近性对企业跨界合作具有阻碍作用
L3XBX		H3: 技术异质性对企业跨界合作具有促进作用
2. 企业的关系特征影响技术跨界融合(A&X 网络模型、A&X&B 网络模型)		
C4AXB (加入节点属性)		H4: 关系强度对技术跨界融合具有促进作用
Star2AX (加入节点属性)		H5: 关系广度对技术跨界融合具有促进作用
ASAXASB		H6: 关系依赖性对网络内部技术与外部技术的跨界融合具有阻碍作用

注: ● = 技术元素, ■ = 企业个体, □ = 加入属性的企业个体。

构建的 MERGM 模型中包含 6 种不同的网络模型: A、B 和 X 网络模型分别为技术跨界融合网络、企业跨界合作网络和技术—企业隶属二分网络,用于检验 3 个网络各自的网络特征,保障网络间的多重互动。B&X 网络模型为企业跨界合作网

络和技术—企业隶属二分网络,用于检验企业的技术特征对企业跨界合作的影响,其假设为 H1、H2、H3。A&X 网络模型为技术跨界融合网络和技术—企业隶属二分网络;A&X&B 网络模型为技术跨界融合网络、企业跨界合作网络和技术—企业隶属二分网络,以上两种网络模型共同验证企业的关系特征对技术跨界融合的影响,其假设为 H4、H5、H6。

### 三、实证分析

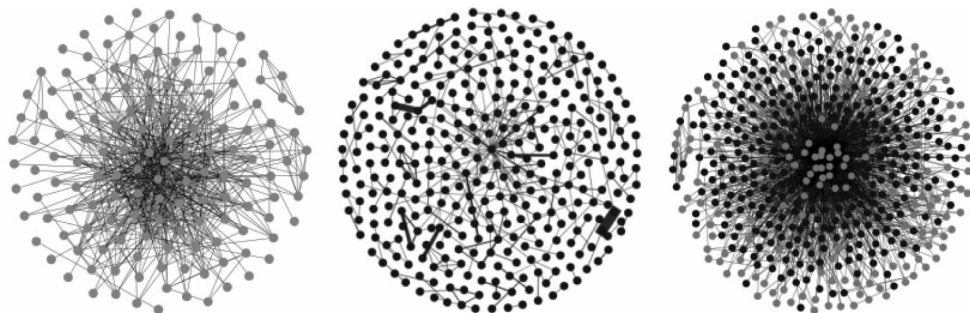
#### (一) 研究对象

本文以虚拟现实技术(Virtual Reality, 简称 VR)为研究对象。VR 技术是 1962 年出现并快速发展起来的新兴技术,其涉及的技术领域较为广泛,包括计算机图形技术、传感器技术、显示技术等多个学科技术,体现了明显的技术跨界。VR 技术已应用于多个领域,更新换代速度较快,企业如果仅靠自身资源,难于满足技术的发展,企业通过跨界合作,提高了技术跨界融合的效率。

#### (二) 网络构建

专利联合申请人通常被认为是构建企业合作创新网络的代表性指标<sup>[34]</sup>。企业跨界合作是企业跨越组织边界,寻求外部资源,提升自身创新能力的重要方式。从专利联合申请人中筛选出属于不同类型企业数据,建立合作创新网络,体现了企业跨界合作的关系。专利信息中所包含的 IPC 分类号,涵盖了多个技术领域,每个 IPC 号对应特定的技术领域,使用 IPC 共现数据可以有效的表示技术间跨界融合的关系<sup>[35]</sup>。因此,本文采用德温特(DerwentInnovation)专利数据库,搜索与虚拟现实技术相关的关键词,检索表达式为 TS = "virtual reality" OR "environment × model × " OR "visual reality",获取 2008—2021 年 VR 技术的专利数据,通过提取专利信息中专利联合申请人共现数据、IPC 共现数据、IPC 分类号与专利申请人的隶属关系,分别构建企业跨界合作网络、技术跨界融合网络以及技术—企业隶属二分网络。

借助 Gephi 软件,绘制 A、B、X 3 个不同的网络图谱,其中灰色节点表示技术,黑色节点表示企业,相同节点间的连线表示技术融合或者企业合作关系,不同节点间的连线表示技术与企业的隶属关系,如图 2 所示。



a. 技术跨界融合 A 网络

b. 企业跨界合作 B 网络

c. 技术—企业隶属 X 网络

图2 新兴技术跨界融合多层网络图谱

(三)描述性分析

表4是A、B、X3个网络整体的描述性分析。

A网络为技术跨界融合网络,其节点数为151,边数为731;B网络为企业跨界合作网络,其节点数为351,边数为325;X网络为技术—企业隶属二分网络,其节点数为502,边数为2239。

表4 多层网络描述性统计

变量	A 网络	B 网络	X 网络
节点数	151	351	502
边数	731	325	2239
平均度	10.083	1.929	9.102
网络密度	0.073	0.006	0.019
平均路径长度	2.338	4.583	—
平均聚类系数	0.77	0.491	—

通过比较3个网络中边数与节点数的相对比例,在A网络中节点联系较为频繁,网络密度较大,平均路径长度较短,意味着节点之间连接数量较多,距离较短,联系较为紧密,技术跨界融合的频率相对较高,且平均度为10.083,表明与某一技术领域发生跨界融合的技术领域数量较多,跨界融合的范围较广。

节点度排名前十的技术领域排名情况,如表5所示。节点度表示某一节点在网络中与其他节点直接相连的程度。其中G06F、G06T、H04N、G02B四种技术的节点度较大,意味着与其发生融合的技术领域较多,促进网络中技术连通性的提高;同时四种技术的接近中心度也较大,接近中心度表示一个节点与其他节点距离的相近程度,接近中心度越大表明在网络中与其他节点之间的距离越短,跨界融合发生更加普遍。因此,数字图像处理 and 通信传播等技术是VR技术发展中的关键,促进

网络中的技术跨界融合。

表5 技术跨界融合网络中节点度排名前10的技术领域

IPC	描述	节点度	接近中心度
G06F	电数字数据处理	91	0.748
G06T	一般图像数据处理	64	0.640
H04N	广播通信	45	0.580
G02B	光学元件、系统或仪器	42	0.559
G09B	教学用具及残障人士通信工具等	40	0.552
G06Q	专门适用于行政、商业、金融、管理、监督或预测目的的数据处理系统	39	0.568
G09G	对用静态方法显示可变信息的指示装置	38	0.554
G06K	数据识别、记录载体、记录载体的处理等	36	0.543
H04L	数字信息的传输	28	0.533
A61B	医学外科诊断	26	0.528

B网络与A网络相比,节点数量增多,边数减少,网络密度降低,意味着网络中企业间的合作没有技术间的融合频繁。但与同等规模的随机网络相比,企业跨界合作网络平均聚类系数为0.491,大于相同规模的随机网络(平均聚类系数为0.003),表现出较强的聚集性。同时,网络中的平均路径长度为4.583,低于同等规模的随机网络(平均路径长度为8.609),企业间的合作距离更短,合作更紧密。因此企业跨界合作网络的小世界效应强于同等规模的随机网络,网络具有更好的连通性。

节点度排名前十的企业排名情况,如表6所示。节点度的大小反映企业在合作网络中的活跃程度,节点度越大,表明与该企业进行合作的企业越多。其中,国家电网节点度较高,远超其他企业,表明在跨界合作网络中,其拥有较多的合作伙伴,便于进行资源的交换,促进VR的运用与发展。

同时,网络中排名前 10 的企业接近中心度较大,差别较小,表明网络中节点之间的距离较短,连通性较强,便于企业进行技术和知识等信息的传播。

表 6 企业跨界合作网络中节点度排名前十的企业

企业名称	节点度	接近中心度
STATE GRID CORP CHINA(国家电网)	59	0.656
SONY CORP(索尼)	12	0.514
SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD(三星)	11	0.486
BOE TECHNOLOGY GROUP CO LTD(京东方)	9	0.462
FACEBOOK TECHNOLOGIES LLC(脸书)	8	0.423
KEDONG ELECTRIC POWER CONTROL SYSTEM CO(科东电力)	8	0.428
GOERTEK INC(歌尔股份)	7	0.412
NARI TECHNOLOGY CO LTD(南瑞科技)	7	0.414
CHINA MOBILE COMMUNICATIONS GROUP CO LTD(中国移动)	6	0.406
GUANGZHOU HUANJING TECHNOLOGY CO LTD(广州幻境)	6	0.405

X 网络为技术—企业隶属网络,网络中不同层次节点间也频繁发生联系,如图 3 所示,灰色节点为技术元素,黑色节点为企业个体,两层之间的连线较为密集,表明技术与企业之间存在着高频互动。此外,连接度表示某一层的某一节点连接其他层节点的程度,表 7 的数据中显示,一种技术平均能被大约 15 个企业所拥有,且 G06F(电数字数据处理)技术被 VR 领域的大多数企业所运用;而一个企业平均拥有 VR 技术中近 7 个技术领域,拥有技术种类最高可达 37 种,意味着技术跨界融合网络与企业跨界合作网络不是完全同构,但两层之间存在着密切的联系,有利于技术跨界融合网络与企业跨界合作网络的多重联动。

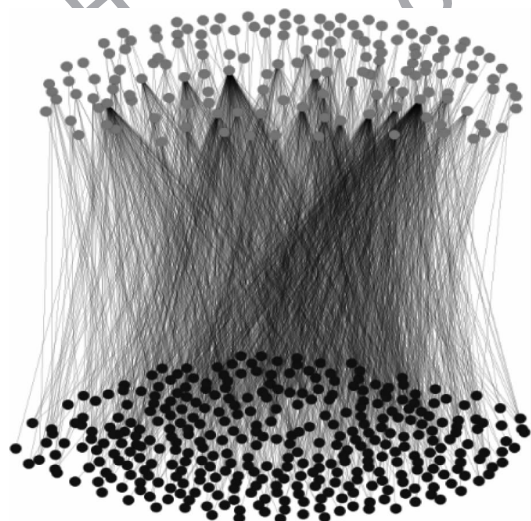


图 3 技术—企业隶属关系

表 7 技术—企业隶属关系

隶属方向	平均连接度	最大连接度	最小连接度
技术→企业 (一个技术被多少企业拥有)	14.82	246(G06F)	1
企业→技术 (一个企业拥有多少技术)	6.57	37 (OCULUS VR LLC)	1

(四)模型结果分析

利用虚拟现实技术的相关专利数据,运用 MPnet 软件运行 MERGM 模型,检验 3 个网络分别具有的网络特征,验证企业的技术特征与企业跨界合作,验证企业的关系特征与技术跨界融合的关系,以上结果如表 8 所示。其中,参数值表示了所选择的网络模式出现在实际网络中的可能性,一个正(负)且显著的参数表明在网络中观察到这个配置的可能性较大(较小)。

表 8 MERGM 运行结果

模式	参数	标准误差	结果
技术跨界融合网络特征(A 网络模型)			
EDREA	-5.846 5 *	0.089 0	/
ASA	0.812 2 *	0.001 0	具有扩张性
ATA	1.955 6 *	0.007 0	具有传递性
企业跨界合作网络特征(B 网络模型)			
EDREB	-3.542 1 *	0.536 0	/
ASB	-0.456 9 *	0.214 0	不具有扩张性
ATB	0.080 6 *	0.035 0	具有传递性
技术—企业隶属网络特征(X 网络模型)			
XEDGE	-6.066 7 *	0.741 0	/
XASA	1.147 1 *	0.088 0	具有连通性
XASB	0.396 4 *	0.070 0	具有连通性
企业的技术特征影响企业跨界合作(B&X 网络模型)			
STARAXAB	-0.298 8 *	0.008 0	不支持 H1
TRIANGLEXBX	-0.020 5 *	0.003 0	支持 H2
L3XBX	0.001 2 *	0.000 1	支持 H3
企业的关系特征影响技术跨界融合(A&X 网络模型、A&X&B 网络模型)			
C4AXB(加入节点属性)	0.013 0 *	0.001 0	支持 H4
STAR2AX(加入节点属性)	0.074 0 *	0.019 0	支持 H5
ASAXASB	-0.008 0 *	0.002 0	支持 H6

注: \* 表示显著性,即参数与标准误差比值的绝对值大于 2。

A、B 与 X 网络模型用来验证 3 个网络各自的网络特征,保障网络间的多重联动。EdgeA、EdgeB 与 XEdge 模式对应网络结构中的边,类似于线性回归方程中的截距。ASA 的参数显著为正,说明技术跨界融合网络表现出扩张性,即一种技术能够同时与多种其他技术跨界融合,促进更多融合关系的形成。ATA 的参数显著为正,表明技术跨界融合网络中倾向于出现闭合三角形结构,具有

传递性,即融合相同技术领域的不同技术,更容易建立新的融合关系。在企业跨界合作网络中,ASB显著为负,ATB显著为正,意味着网络中没有表现出扩张性,存在传递性,即共同合作伙伴成为了企业间跨界合作的纽带,而不是直接与更多的企业建立跨界合作关系。XASA与XASB的参数都显著为正,表示技术跨界融合网络与企业跨界合作网络间具有较好的连通性,即一个技术能被多个企业所运用,并且一个企业也能拥有多种技术领域,有利于两层间的多重互动。

B&X网络模型用来验证企业的技术特征与企业跨界合作间的影响关系。StarAXAB的参数显著为负,意味着其网络模式出现可能较小,拥有较多不同种类技术的企业不太愿意进行跨界合作,不支持H1。这是因为企业的技术多元化程度较高,其技术跨界创新能力较强,往往会比其他企业在产品和技术上取得新的突破,企业为了保证自身竞争优势,不愿耗费更多成本与其他企业分享创新成果,同时合作也会增加企业核心技术泄露的风险。TriangleXBX的参数显著为负,表明网络模式出现可能性较小,网络中技术邻近的企业建立跨界合作关系的意愿较弱,支持假设H2。由于相似的技术所覆盖的信息比较重合,知识差距较小,不能帮助企业生产具有差异化的产品,提高企业核心竞争力。因此,企业进行跨界合作的动力不足,不愿与技术邻近的企业进行合作。L3XBX的参数显著为正,说明网络模式出现可能性较大,具有异质性技术的企业间建立合作关系意愿较强,支持假设H3。企业进行跨界合作的目的是获取异质性的资源,扩大企业资源的广度,提升企业创新能力与竞争优势。企业与拥有异质性技术的企业合作,便于企业间异质性知识的交流与吸收,促进企业的持续创新。

A&X网络模型与A&X&B网络模型用来证明企业的关系特征与技术跨界融合间的影响关系。C4AXB的参数显著为正,表明网络模式出现的可能性较大,企业间关系强度有利于企业间的技术跨界融合,支持假设H4。企业间的合作越紧密,其相互信任程度越强,从中得到的技术信息质量越高,有利于发现技术跨界融合的新机会,提升技术

跨界融合的可能性。并且企业间合作紧密能降低发生冲突的可能性,减少技术融合的风险,保证技术跨界融合的顺利进行。Star2AX的参数显著为正,说明网络模式出现可能性较大,企业合作范围越广泛,越有利于企业的技术与外界技术进行跨界融合,支持假设H5。企业在网络中直接合作的伙伴数量越多,接触和获取新知识、新技术的可能性越大,发现和寻找所需技术的时间与成本越少,减少技术跨界融合的前期成本,从更多的合作伙伴中可以获取使用或融合新技术的经验,提升内部科研人员的技术能力。ASAXASB的参数显著为负,说明网络模式出现可能性较小,企业间的合作具有依赖性,会限制网络内部技术与网络外部技术的跨界融合,支持假设H6。企业与其信任且保持长期合作的企业构成创新网络,网络中的企业会进行知识与技术的频繁交流,促进自身创新能力的提升,长期以来会形成路径依赖,从而限制网络内部技术与外部技术的跨界融合。

(五)模型有效性验证

为验证实证结果有效反映网络的显著特征,本文对所选择的网络模式进行拟合优度(Good Of Fit, GOF)检验。拟合优度检验的结果中包括所选择的网络模式,以及其观测数量、平均值、标准偏差和t值。其中t-ratio是对模型拟合程度的一个测度,当t的绝对值不大于2时,拟合情况比较好<sup>[36-37]</sup>。如表9所示,拟合优度检验结果中,文中所选择的网络模式t的绝对值均小于2,表明本文所提出的多层网络模型拟合情况较为良好,模型结果具有一定的说服力。

表9 拟合优度检验

Statistics	Observed	Mean	StdDev	t-ratio
ASA	1 292. 177 8	1 275. 868 0	48. 762	0. 334
ATA	500. 000 0	518. 444 3	24. 381	-0. 756
ASB	2 407. 051 6	2 312. 932 0	156. 256	0. 602
ATB	1 342. 717 3	1 254. 965 8	98. 129	0. 894
XASA	3 129. 612 0	3 261. 572 0	154. 186	-0. 855
XASB	3 348. 468 9	3 475. 368 0	167. 153	-0. 759
StarAXAA	4 578. 443 1	4 624. 046 0	281. 487	-0. 162
TriangleXAX	127. 000 0	135. 996 0	18. 120	-0. 496
L3XAX	1 836. 000 0	1 860. 167 0	80. 222	-0. 301
Star2BX(加入属性)	2 072. 000 0	2 104. 386 0	101. 303	-0. 319
C4AXB(加入属性)	1 201. 000 0	1 254. 939 0	69. 154	-0. 779
ASAXASB	15 779. 591 5	16 143. 421 4	1 730. 802	-0. 210



#### 四、结论与展望

实证结果表明:企业的技术特征影响企业的跨界合作。其中技术多样性对企业跨界合作具有抑制作用,即企业自身技术多元化程度较高,为了保证其竞争优势以及防止技术泄露,企业可能倾向于不进行跨界合作;技术邻近性对企业跨界合作具有阻碍作用,说明相似的技术不利于企业知识的重组与价值的创造,降低创新的可能性,企业不愿选择与技术邻近的企业合作;技术异质性的企业跨界合作具有促进作用,意味着异质性技术能帮助企业生产差异化产品,增强竞争优势,有利于企业间的跨界合作。

企业的关系特征影响技术的跨界融合。其中关系强度对技术跨界融合具有促进作用,即合作关系较为紧密的企业,其相互信任程度较强,有利于分担技术融合带来的风险与成本,同时获得的信息质量较高,有利于发现技术跨界融合的新机会;关系广度对技术跨界融合具有促进作用,表明企业合作范围广泛,有利于增强发现和获取新技术的可能性,另外从众多合作伙伴中获取的经验,可以增强企业科研人员的技术能力,促进技术跨界融合的实现;关系依赖性对网络内部技术与外部技术的跨界融合有阻碍作用,说明企业对于其合作网络中的伙伴信任程度较高,愿意在网络中进行频繁的资源交流,长期以来形成路径依赖,限制网络内部技术与网络外部技术的跨界融合。

#### 参考文献:

- [1]姜翰,金占明. 企业间关系强度对关系价值机制影响的实证研究——基于企业间相互依赖性视角[J]. 管理世界,2008(12):114-125,188.
- [2]杨靓,曾德明,邹思明,等. 科学合作网络、知识多样性与企业技术创新绩效[J]. 科学学研究,2021,39(5):867-875.
- [3]WANG M C, CHEN P C, FANG S C. A critical view of knowledge networks and innovation performance; the mediation role of firms' knowledge integration capability[J]. Journal of business research,2018(88):222-233.
- [4]段庆锋,冯珍. 多维视角下技术距离对企业研发合作关系影响的实证研究[J]. 科技进步与对策,2020,37(14):110-117.
- [5]CEIPEK R, HAUTZ J, MAYER M C J, et al. Technological

diversification; a systematic review of antecedents, outcomes and moderating effects [J]. International journal of management reviews,2019,21(4):466-497.

[6]梁杰,谢恩. 研发联盟多伙伴关系断层对企业创新绩效的影响研究[J]. 软科学,2020,34(4):26-30.

[7] AGGARWAL V A. Resource congestion in alliance networks; how a firm's partners' partners influence the benefits of collaboration[J]. Strategic management journal,2020,41(4):627-655.

[8] ROSSMANNEK O, RANK O N. Is it really a universal phenomenon? preferential attachment in alliance networks [J]. European management review,2021,18(1):85-99.

[9] GUAN J C, YAN Y. Technological proximity and re-combinative innovation in the alternative energy field [J]. Research policy,2016(45):1460-1467.

[10]刘凤朝,张淑慧,朱姗姗. 技术知识多样性的双重作用:专利受理及创新影响——基于对象—过程视角的研究[J]. 中国软科学,2018(9):148-159.

[11] CHEN H, XIE F. How technological proximity affect collaborative innovation? an empirical study of China's Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of management analytics, 2018,5(4):287-308.

[12]王宛秋,马红君. 技术邻近性、研发投入与技术并购创新绩效——基于企业生命周期的视角[J]. 管理评论,2020,32(6):104-113.

[13] BRENNECKE J, RANK O. The firm's knowledge network and the transfer of advice among corporate inventors—a multilevel network study [J]. Research policy, 2017, 46(4):768-783.

[14] SYTCH M, TATARYNOWICZ A. Exploring the locus of invention; the dynamics of network communities and firms' invention productivity [J]. Academy of management journal, 2014,57(1):249-279.

[15]刘刚,殷建瓴,耿天成. 产业间距离、技术异质性与企业并购绩效——基于A股上市企业的实证研究[J]. 中国软科学,2020(12):104-116.

[16]李莉,林海芬,程露,等. 技术群体成员变动、知识流耦合与产业创新网络抗毁性:技术异质性的调节作用[J]. 管理工程学报,2022,36(1):25-36.

[17] QI Y, ZHANG X, HU Z, et al. Choosing the right collaboration partner for innovation; a framework based on topic analysis and link prediction [J]. Scientometrics, 2022, 127(9):5519-5550.

[18]高霞,陈凯华. 合作创新网络结构演化特征的复杂网

- 络分析[J]. 科研管理,2015,36(6):28-36.
- [19] ZHENG Y, YANG H. Does familiarity foster innovation? the impact of alliance partner repeatedness on breakthrough innovations[J]. *Journal of management studies*,2015,52(2): 213-230.
- [20] POPPO L, ZHOU K Z, LI J J. When can you trust "trust"? calculative trust, relational trust, and supplier performance[J]. *Strategic management journal*,2016,37(4): 724-741.
- [21] 王建平, 吴晓云. 竞合视角下网络关系强度、竞合战略与企业绩效[J]. 科研管理,2019,40(1):121-130.
- [22] 孙世强, 陶秋燕. 小微企业关系强度、知识共享与其创新绩效关系研究——吸收能力的调节效应[J]. 科学决策,2019(5):14-33.
- [23] 杨张博, 王钦. 结构的力量: 联盟网络对企业技术创新影响研究[J]. 科研管理,2022,43(7):154-162.
- [24] GNYAWALI D R, MADHAVAN R. Cooperative networks and competitive dynamics: a structural embeddedness perspective [J]. *Academy of management review*,2001,26(3):431-445.
- [25] 王建平. 中国制造企业网络关系异质性和稳定性对探索式创新的影响: 知识冗余的调节效应[J]. 科研管理, 2020,41(11):90-99.
- [26] MC KELVEY M, LJUNGBERG D. How public policy can stimulate the capabilities of firms to innovate in a traditional industry through academic engagement: the case of the Swedish food industry [J]. *R&D management*, 2017,47(4): 534-544.
- [27] 邹思明, 曾德明, 张利飞, 等. 网络关系、技术多元化与企业技术标准能力[J]. 科研管理,2017,38(9): 12-20.
- [28] 邓渝. 市场还是关系依赖? 联盟伙伴选择导向对企  
业技术创新的作用机制研究[J]. 外国经济与管理,2016, 38(5):18-31,43.
- [29] 毛荐其, 武宪云, 刘娜. 发明者多层次创新网络嵌入对知识搜索的影响机制研究[J]. 科学决策,2020(7): 1-21.
- [30] 毛荐其, 嵇金星, 刘娜, 等. 发明者网络嵌入、稳定性与创新绩效的关系研究[J]. 科学决策,2021(3):1-17.
- [31] LUSHER D, JOHAN K, GARRY R. Exponential random graph models for social networks: theory, methods, and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [32] WANG P, ROBINS G, PATTISON P, et al. Social selection models for multilevel networks[J]. *Social networks*, 2016(44):346-362.
- [33] 胡欣悦, 汤勇力, 王国庆, 等. 研发国际化、跨国知识网络与研发单元创新绩效——基于华为 PCT 专利(2002—2013年)的面板数据分析[J]. 系统工程理论与实践, 2018,38(12):3124-3139.
- [34] 杨春白雪, 曹兴, 高远. 新兴技术合作创新网络演化及特征分析[J]. 科研管理,2020,41(7):20-32.
- [35] JEONG S, KIM J C, CHOI H J Y. Technology convergence: What developmental stage are we in? [J]. *Scientometrics*,2015, 104(3):841-871.
- [36] GONDAL N. Duality of departmental specializations and PhD exchange: a Weberian analysis of status in interaction using multilevel exponential random graph models (MERGM) [J]. *Social networks*,2018(55):202-212.
- [37] 刘晓燕, 侯文爽, 单晓红. 基于多层网络的科技创新政策府际合作机理[J]. 科研管理,2021,42(3):97-108.

(本文责编:海洋)