

基于动态复杂网络的 突破性技术创新识别方法研究

周文浩, 吴炳毅, 李海林, 王盼兮

(华侨大学工商管理学院, 泉州 362021)

摘 要 识别和预见突破性技术创新对于精准实施技术干预、加快形成新质生产力具有重要意义, 而传统的单一计量指标难以充分反映突破性技术创新的丰富内涵与多维度特征。在技术跃迁理论和知识重组理论基础上, 本文基于动态专利相似网络构建了一种新颖的突破性技术创新两阶段识别方法, 综合考虑了技术新颖性和技术影响力两个特征, 并在 982 家中国制造业企业的 61431 项授权专利的实证研究中成功识别出 3738 项突破性技术创新, 占比为 6.085%, 其中独立突破性技术和知识重组突破性技术分别占 3.488% 和 2.596%。进一步采用主题模型提炼突破性技术创新的主要研究领域和方向, 并结合经济后果验证、典型技术案例、技术领域演化案例和多统计模型综合验证了识别结果的有效性与稳健性。研究成果为突破性创新相关研究提供了可行的识别框架和工具, 在实践层面上为技术预见和技术政策制定提供了重要参考依据。

关键词 突破性技术创新; 动态复杂网络; 专利相似度; 国际专利分类

Identification Methodology Research for Breakthrough Technological Innovations Based on Dynamic Complex Networks

Zhou Wenhao, Wu Bingyi, Li Hailin and Wang Panxi

(College of Business Administration, Huaqiao University, Quanzhou 362021)

Abstract: Identifying and anticipating breakthrough technological innovations is critical for precisely implementing technological interventions and accelerating the formation of new quality productive forces. However, traditional single-measurement indicators cannot fully reflect the rich connotation and multidimensional characteristics of breakthrough technological innovations. Based on the theory of technological leap and knowledge recombination theory, this study constructed a novel two-stage identification method for breakthrough technological innovations based on a dynamic patent similarity network. It comprehensively examined two characteristics: the source of technological novelty and the impact of technology. The empirical study of 61431 authorized patents from 982 Chinese manufacturing enterprises successfully identified 3738 breakthrough technological innovations, accounting for 6.085%. Among them, independent and knowledge recombination breakthrough technologies accounted for 3.488% and 2.596%, respectively. Further, topic models were used to refine the main research fields and directions of breakthrough technological innovations. The effectiveness and robustness of the identification results were comprehensively verified by combining economic consequences, typical technology cases, technology field evolution cases, and multiple statistical models. The research findings provide a feasible identification

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-07-19

基金项目: 国家社会科学基金项目“基于大数据分析的科研主体创新绩效影响机制研究”(22FGLB035)。

作者简介: 周文浩, 男, 1997 年生, 博士研究生, 研究方向为突破性技术创新; 吴炳毅, 男, 2003 年生, 本科生, 研究方向为创新管理、数据挖掘; 李海林, 通信作者, 男, 1982 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数据科学与创新管理, E-mail: hailin@hqu.edu.cn; 王盼兮, 女, 2003 年生, 本科生, 研究方向为创新管理。

framework and tools for breakthrough innovation-related research and technology foresight and technology policy formulation on the practical level.

Keywords: breakthrough technological innovation; dynamic complex networks; patent similarity; international patent classification

0 引言

突破性技术创新是国家摆脱技术依赖、打破技术垄断、引领原创成果攻关突破的“国之重器”。目前,我国科技发展水平特别是关键核心技术的创新能力同国际先进水平仍有一定差距,核心技术遭受的围追堵截无疑为科技界敲响了警钟^[1]。如何实现突破性技术创新,解决“卡脖子”关键难题,进而实现科技强国目标始终是各行各业重点关注的话题。尽管我国的专利申请量长期稳居世界首位,但在关键核心技术上尚未形成与制造能力相匹配的创新能力。因此,准确识别和预见海量专利中的突破性技术,对于发现突破性技术元素及组合模式、把握技术攻关的未来方向至关重要,这也是企业进行弯道超车、新兴产业实现后发追赶的重要抓手。因此,如何系统性识别海量专利中的突破性技术创新并将其转化为先进生产力成为学术界广泛关注的话题^[2]。

突破性技术创新是指造成产业技术轨迹发生非连续性变化并引起产品性能跃迁或功能变化、有潜力重塑或催生出全新市场格局的技术创新^[3],其作为突破性创新的一个重要子集,专注于技术层面的创新活动,涉及新技术的开发或现有技术的全新应用。这些技术活动能够引领技术发展新方向,开辟新的市场空间,并对后续技术市场格局产生重大影响,一般以专利技术的表现形式出现。现有研究主要从3个视角出发进行识别:一是专利引证视角,采用专利被引频^[4]、非专利科学文献^[5]、引文结构差异^[6]等归纳技术的突破性模式;二是专利内容视角,聚焦于从专利的文本信息^[7]、获奖情况^[8]、IPC(international patent classification)分类号^[9-10]等方面提取突破性技术的主题或特征;三是技术演化视角,从行业技术的动态演化过程中识别突破性技术的演化轨迹^[11]。然而,中国专利市场中大多数专利的信息并非完全披露,因此,公开数据中的专利引用情况可能并不完整,难以真实反映其引用结构。技术演化识别方案主要聚焦于技术轨迹的非连续性

特征,动态地测度专利新颖性及经济影响,忽视了其来源特征,难以区分突破性技术创新和渐进性技术创新。此外,由于IPC分类号能够较好地反映专利的技术和知识领域^[8],大多数现有研究采用IPC分类号的前四位来反映专利的技术元素^[9],这在一定程度上是对专利信息的简化处理。

为保证突破性技术创新识别的准确性与有效性,既要全面刻画一项专利所蕴含的技术特征,也要综合事前事后阶段对突破性技术创新的来源性质和经济后果进行动态检验。本文基于完整的IPC分类信息构建专利相似网络,采用复杂网络刻画专利知识间的知识流过程,通过事前检验和事后评价两个阶段,构建突破性技术创新的识别框架。以中国制造业授权发明专利为样本进行实证研究,通过案例分析、专家评审和实证检验等验证了识别结果的有效性与稳健性,为后续关于突破性创新研究及产业内的关键技术发现提供理论和实践指导。

1 相关研究

1.1 突破性技术创新

“突破性技术创新”源于熊彼得的“创造性破坏”理论,这一思想认为新兴企业可以通过突破性技术创新来威胁甚至颠覆大企业的基于成熟技术创新的市场垄断地位^[12]。其特点在于非连续性和变革性^[13]。与之相对的是“渐进性技术创新”,即针对市场需求在原有技术基础上进行功能拓展、性能提高等优化的过程创新^[14]。从发明专利层面界定突破性技术创新的概念内涵主要是基于技术演化周期理论^[15-16]、知识重组理论^[17]和技术跃迁理论^[9,18]^①进行的。

技术演化周期理论认为突破性技术创新是非连续性的,先从原有的成熟的技术和知识轨迹中脱离出来,造成技术轨迹断裂^[19],而之后的技术创新对突破性技术创新的模仿、学习和改进形成了新的轨

^① 本文将此概念定位为对着重强调突破性技术创新的不可预测性、偶然性、独特性研究的归纳,也有学者称其为“基于系统突变的偶然性视角”或“突变理论视角”。

迹^[15]。在时间-专利数量（专利累积量^①）坐标轴上，突破性技术创新的技术轨迹呈现为一条S形演化曲线，突破性技术创新往往在曲线最前端或新旧曲线的重叠部分涌现^[16]。

知识重组理论和技术跃迁理论着重强调突破性技术创新的新颖性特征，依据知识基础理论，前者反映了异质性知识之间的交叉、融合与再重组，后者则反映了突变知识特征。本文认为两者的关系同“创造力的盲变和选择性保留”理论中关于“创造力来自新思想的突变或对旧的知识元素进行重新组合”的理念相同^[20]。知识重组理论认为，创新源于现有概念和事物的重新组合^[21]，因此，技术创新的突破性源自其知识元素与过去技术创新的差异与创造。具体来说，这种差异体现为将新的知识元素引入现有学科领域，表征为不同领域知识元素的交叉应用^[18,21]。学者们认为，更广泛的知识宽度有利于提高产生突破性技术创新的概率，这种知识重组被认为带来了非常成功和具有经济价值的技术创新产出^[22]。最后，技术跃迁理论强调突破性技术创新的出现具有偶然性、不确定性、非连续性和不可预测性^[2]。因此，在该理论视域中，技术发展轨迹并不遵循技术演化S形曲线^[23]，而是覆盖了从产品研发到商业价值的所有阶段^[24]。

本文将技术跃迁理论和知识重组理论纳入同一理论框架，将突破性技术创新的来源定义为两个方面：一是建立在全新知识体系上的技术创新，这类突破性技术通常开发具有特定功能的产品，进而开辟了全新的利基市场；二是在现有知识沉淀与积累的基础上，建立或唤醒全新知识链而实现知识重组的技术突破。此外，相较于处于同一技术环境其他的技术创新，突破性技术创新还具有更高的技术影响力，体现在其能够促进同一技术领域或相关技术领域的迸发式发展，对先前的技术范式造成冲击，引发原始技术轨迹断裂并形成新的轨迹。

1.2 突破性技术创新的识别

识别突破性技术创新是突破性创新理论迈向实践，以及研究突破性技术创新形成机制、经济后果的关键步骤。学术界识别突破性技术创新主要是通过主观评价和客观分析两种方式，前者是对某一产品或技术的根本特征进行专家组判断和打分^[25]，从而衡量技术的突破性程度，但这种方式存在严重的

主观偏见。因此，较为主流的识别方案仍是以定量分析为主的数据实验方案，主要从专利引证视角、专利内容视角和技术轨迹视角3个方面开展研究。

关于专利引证视角，通过一项专利的引证记录和引文结构可以体现专利与其他专利之间的关系，从侧面反映一项技术的新颖性与影响力。其中，专利被引量是最常用的指标，其在一定程度上反映了专利对未来技术的影响，被多数学者用于突破性技术创新的识别^[4]及实证研究中^[3]。例如，Schoenmakers等^[26]基于半导体行业专利数据验证了高被引量的专利更容易成为突破性技术创新；Dahlin等^[18]基于专利的引文结构差异来识别突破性技术创新，认为一项专利的引用结构差异越大，其越有可能是突破性技术创新。

关于专利内容视角，专利数据中蕴藏着同技术创新相关的大量有价值信息，学者们主要从专利文本^[7]和IPC分类号信息^[10]两个方面识别突破性技术创新。例如，张金柱等^[5]根据专利引用的科学知识差异程度来反映技术突变程度，并将其应用于基因工程领域突破性技术创新识别研究；Kaplan等^[22]、韩芳等^[27]通过LDA（latent Dirichlet allocation）主题模型来发现专利中的新颖主题，根据新主题的概率来识别突破性创新；Aharonson等^[28]基于专利间技术相似性的测度方式，识别具有突破性的异常专利。

关于技术轨迹视角，突破性技术创新与传统技术创新不同，其技术轨迹具有非不连续性，一般要经历一个长期稳定的发展阶段后出现轨迹跃迁^[29]，这为识别突破性技术创新提供了理论基础。苏屹等^[30]借鉴突变理论中的尖点突变模型构建了技术创新形成机理模型，归纳了突破性创新的形成过程。Small等^[11]通过主题的演化过程来识别科学技术中的重大突破。Funk等^[31]通过动态网络挖掘方法来识别一项新技术对过去技术及整个技术演化轨道的影响。

经文献梳理可知，首先，主流识别方案主要是从突破性技术创新的影响因素和经济结果两个方面入手，大多需要依赖专利引证信息。本文认为，专利被引证应当是突破性技术创新的必要非充分条件，因为经选择性优化的渐进性技术创新往往更具市场价值。其次，在实际的专利申请过程中，创新主体主要关注权利要求和技术优势的披露以保护知识产权，因此，专利的引证信息可能发生信息失

^① 在时间-专利累积量的二维坐标轴上，专利累积量将逐步收敛，其曲线斜率可用于表示基于时间-专利申请量坐标轴的突破性技术创新曲线，后者似钟形。

真。再其次，现有研究主要聚焦于突破性技术创新对未来技术的变革式影响或知识来源两类特征，少有研究将事前与事后阶段进行综合对比以全面反映技术创新的突破性。此外，目前还没有一种能在特定技术环境中综合考虑突破性技术创新的知识重组和突变两类来源特征的识别方案。因此，本文提出的更系统、全面的突破性技术创新识别方案是对现有研究的丰富和拓展，对有效推动突破性创新理论与实践融合具有重要价值。

2 突破性技术创新识别方法

2.1 突破性技术创新的标准

自然选择理论认为，生物的变异、遗传和自然选择作用能导致生物的适应性改变。本文借鉴该思路构建了一种突破性技术创新识别方案：在一定的技术环境中，技术创新中的新颖技术知识经重组和突变两种方式产生，经过市场的检验和选择，真正具有突破性的技术知识得以保留，并成为后续技术创新的知识基础。因此，突破性技术创新应满足新颖性前提并具有一定的影响力。

(1) 技术新颖性

Simonton^[20]认为创造力源自新思想的突变或旧知识的重组。一方面，技术创新的新颖性体现在焦点技术有着较先前技术环境更加独特的知识元素，是对全新技术领域的开辟和原始性创新；另一方面，突破性技术创新并非完全是原始性创新，从知识重组视角出发对现有知识体系的深度探索、重组、集成和再利用也是技术变革的重要来源。因此，技术新颖性要么源自对新领域开辟的独立特征，要么是基于原有知识体系的深度重组特征，二者皆是构成技术突破的前提条件。

(2) 技术影响力

并非所有技术创新都将产生深远的影响和效益，因为技术的发展和推广存在极高的不确定性且产生影响的过程相对漫长。但突破性技术创新不仅具备较高的新颖性，同时也必然对后续的技术发展产生不可忽视的影响^[9]。其影响力体现在突破性技术对后续技术研发领域造成范式改变、轨迹跃迁等变革性影响，其开辟了新的研究领域并对以往的技术发展轨迹进行阻断。

综上，本文定义突破性技术创新的3类特征。(a) 知识重组特征：技术创新在过去的海量技术中占据完全结构洞位置、发挥桥梁作用，具备了其他

不同领域的知识继承，因此，实现了来自其他知识领域的深度融合和重组，这使其拥有更大的知识组合新颖性和技术突破可能性；(b) 独立突破特征：技术创新完全建立在全新的技术领域，是与过去的技术研发范式完全不同的创造性变革，在过去的海量专利群中是明显的离群节点；(c) 技术影响力：技术创新开辟了全新的技术领域或市场，为后续技术发展指明了新的方向，同时也阻断了以往技术专利的影响力，其对后续专利技术的影响程度要高于过去专利对后续技术的影响。

其中，特征(a)和特征(b)反映焦点技术的新颖性，需引入事前检验过程以确定初步的候选突破性创新(candidate innovation, CI)，也由此将其区分为知识重组型候选创新(knowledge reorganization candidate innovation, KRCI)和独立型候选创新(independent candidate innovation, ICI)。两种候选突破性技术创新并不一定具备突破性，还需引入焦点技术的事后评价过程，通过检验技术的后续影响力来进一步确定突破性技术创新。因此，本文规定，一项技术创新同时满足特征(a)和特征(c)时，称其为知识重组型突破性技术创新(knowledge reorganization breakthrough innovation, KRBI)；同时满足特征(b)和特征(c)时，则称其为独立型突破性技术创新(independent breakthrough innovation, IBI)。

2.2 专利相似网络

任何一项新技术都出现在由其他技术共同组成的技术环境中，要识别一项突破性技术创新，不仅要评估自身的技术特征，更要关注其在整个技术环境中的表现和适应能力^[32]。专利相似网络是从复杂系统视角将专利转化为网络中的节点，将专利间的技术相似度作为网络关系纽带的特殊拓扑结构，节点间的专利相似性反映了专利间的相互影响程度，有利于系统分析和理解其中关键节点的影响力和整个技术环境。要构建专利相似性网络，其核心在于专利之间的相似性度量。国际专利分类法独特的分层结构充分反映了不同专利的技术领域，且任何一项技术专利都有其独特的技术标识，因此，常被用于测度专利的技术属性。

IPC分类号将专利以逐层编号的形式进行知识体系分离，划分为部(section)、类(class)、子类(subclass)、组(group)和子组(subgroup)5个层面。本文以专利的IPC分层结构为基础，先通过比

对完整IPC分类号信息间的层级编码差异来计算IPC相似性,再对两个专利的IPC分层结构进行两两计算,将IPC相似性汇总至专利层面,进而得到不同专利间的相似程度。以专利号B62D33/06为例,该IPC分类号经层次结构可逐级分解为5个层次:“B”“B62”“B62D”“B62D33/00”和“B62D33/06”。同理,对于任意两个IPC分类号的有序向量IP-CVec- i 和IPC- j ,逐步匹配向量IP-CVec- i 和向量IP-

CVec- j 中的元素,并统计成功匹配的数量,则成功匹配的专利层级占全部层数的比重记为两IPC之间的相似度 $\text{Sim}(\text{IPC}_i, \text{IPC}_j)$,如图1所示,最终将不同专利间的IPC相似度两两匹配并标准化,即

$$S_{a,b} = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Sim}(\text{IPC}_i, \text{IPC}_j) \quad (1)$$

其中, n 和 m 分别表示专利A和专利B的IPC分类号数量。

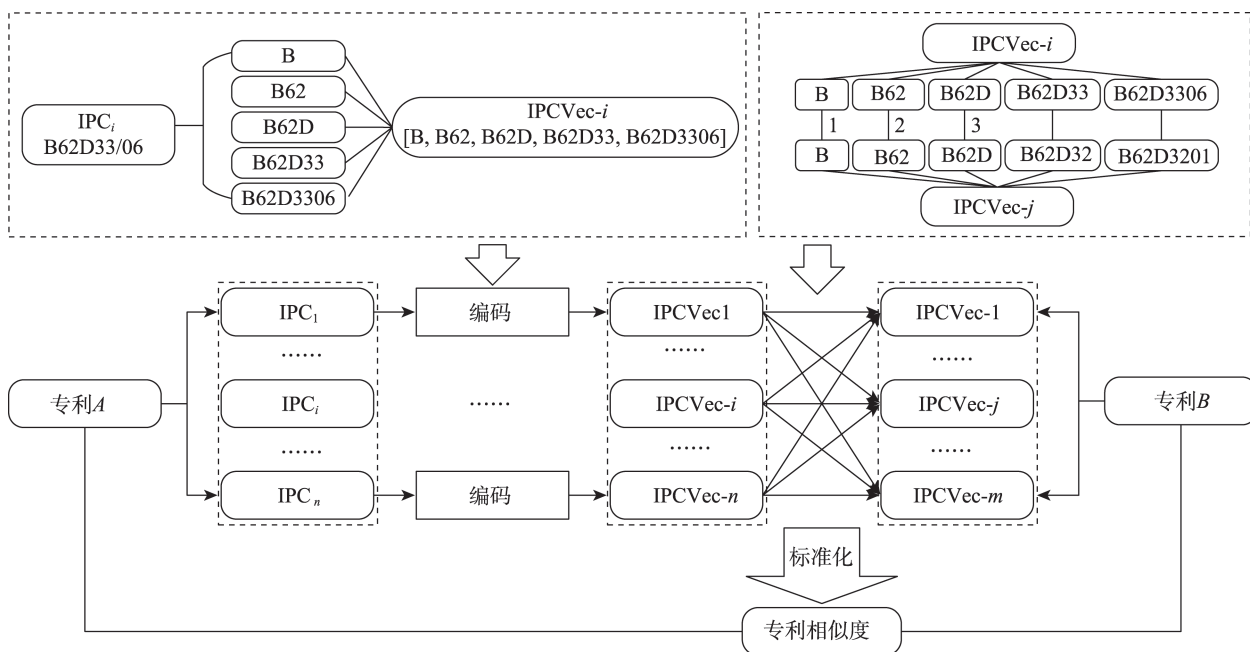


图1 专利相似度计算示意图

基于专利间的相似性结果,以某一特定的相似性为阈值进行划分,将专利相似性矩阵转化为0和1的二值矩阵,可构建形成不同密集程度连接的专利相似网络。相似性阈值结果的设定将会影响最终形成的专利相似网络如图2所示,其展示了不同密集程度的拓扑网络结构。本文以特定时期内所有专利相似性的均值为阈值,对高于均值的专利间形成一条连边,进而构建特定窗口下的专利相似网

络,为后续的突破性技术专利识别提供网络基础。

2.3 突破性技术创新的两阶段识别方法

2.3.1 阶段一:判断来源特征

新颖性是一项突破性技术创新的前提条件,可以通过知识元素的独特性或知识组合方式的新颖性来体现。首先,基于专利相似度计算过程构建 $t-5$ 期至 $t-1$ 期的专利相似性网络 N_0 ,将第 t 期的第 i 项

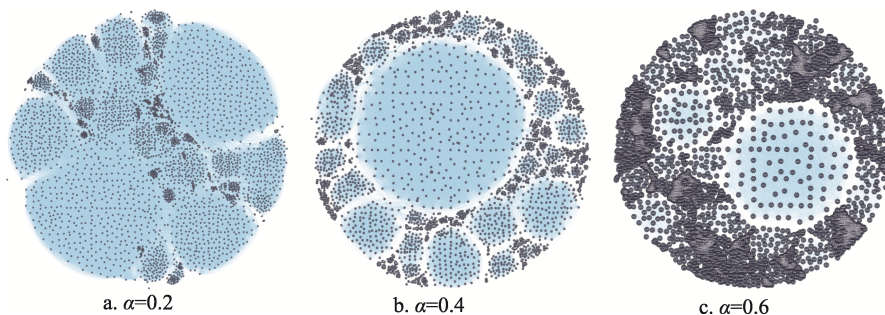


图2 不同阈值下的专利相似度网络

专利 P_i 置于专利相似度网络 N_0 中形成 $t-5$ 年至 t 年的增广专利相似度网络 N_0^i 。进一步地，通过如下逻辑

判断专利 P_i 是否实现了独立突破或知识重组突破，识别过程如图 3 所示。

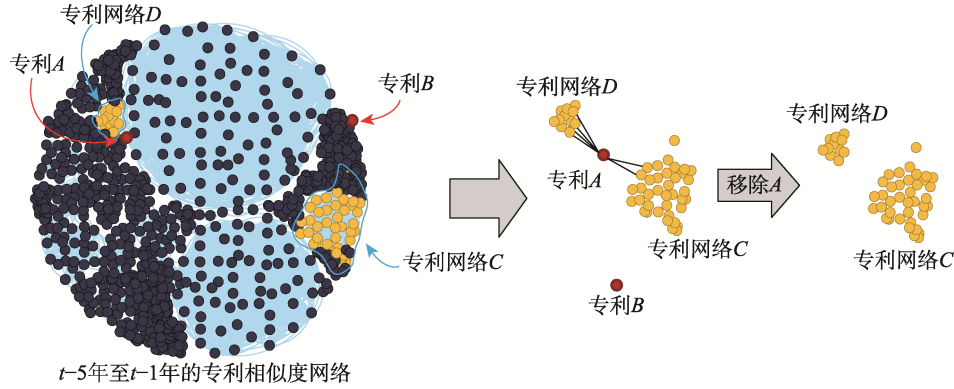


图3 独立性和知识重组识别示意图

(1) 独立突破候选：若 P_i 在网络 N_0^i 中的特征符合图 3 中的专利 B，即不存在任何边的独立点，则认为其在网络 N_0^i 中具有充分的独特性与新颖性，与过去 5 年的其他专利皆未产生连接关系，将其加入独立突破性技术创新候选集合 U_0 。

(2) 知识重组突破候选：相应地，若 P_i 在网络中的特征符合图 3 所示的专利 A，即连接了两个本互不相通的专利网络（网络 C 和网络 D，这些专利网络中的专利具有相似的 IPC 分类号，代表特定的技术领域），则认为专利 P_j 继承了来自不同专利网络的知识，即占据了充分的结构洞位置，其知识结构涵盖两个技术领域。专利 A 实现了过去不同领域知识元素的深度重组，则将其加入知识重组型突破性技术创新候选集合 U_1 。同时，记录 P_j 在过去 5 年中直接连接的所有相关专利记为 $PP_j^{N_0} = \{P_1^{N_0}, \dots, P_n^{N_0}\}$ (prior patent of P_j in network N_0)。

2.3.2 阶段二：评估相对技术影响力

影响力是验证候选突破性技术是否真的具备突破性的重要特征。在该阶段，同样构建 $t+1$ 期至 $t+5$ 期的专利相似性网络 N_1 ，分别将突破性技术创新候选集合 U_0 和 U_1 中的任一专利 $P_i^{U_0}$ 和 $P_j^{U_1}$ 置于专利相似度网络 N_1 ，构建 $t+1$ 年至 $t+5$ 年的增广专利相似度网络 N_1^i 和 N_1^j 。参考马荣康等^[9]的研究，一项专利技术影响力越大，则未来专利与该专利之间的相似度越高。进一步地，在增广网络中将得到 $P_i^{U_0}$ 和 $P_j^{U_1}$ 在 N_1^i 和 N_1^j 中所形成的专利簇，分别如图 4 中的专利网络 F 和专利网络 E 所示。

若 $P_i^{U_0}$ 或 $P_j^{U_1}$ 在对应的增广相似度网络 N_1^i 或 N_1^j 中的直接相连专利数量越多，则表明其对未来技术

影响力越高。因此，对于独立突破性技术创新候选集 U_0 中专利 $P_i^{U_0}$ 的技术影响力，计算该专利与增广专利相似度网络 N_1^i 中所有连通点的专利相似度之和，记为 $SS_i^{N_1}$ (sum patent similarity of $P_i^{U_0}$ in network N_1^i)；该值越大，表明 $P_i^{U_0}$ 在时间窗口中的技术影响力越高，越有可能成为突破性技术创新。当其满足在专利相似度网络 N_1^i 中的影响力大于 U_0 中所有专利在专利相似度网络 N_1^i 中的影响力均值时，即

$$SS_i^{N_1} > \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m SS_i^{N_1} \quad (2)$$

则将专利 $P_i^{U_0}$ 识别为突破性技术。其中， m 代表 U_0 的长度。

对于知识重组突破性技术创新候选集 U_1 中专利 $P_j^{U_1}$ 的技术影响力，计算 $P_j^{U_1}$ 在增广专利相似度网络 N_1^j 中的所有连通节点专利相似度之和，记为 $SS_j^{N_1}$ ，其代表了专利 $P_j^{U_1}$ 在后续 5 年内专利群中的技术影响力。同理，将 $t-5$ 期至 $t-1$ 期专利网络中与 $P_j^{U_1}$ 相连接的相关专利分别置于增广专利相似度网络 N_1^j 中计算各自的技术影响力 $PSS_j = \{PSS_j(1), \dots, PSS_j(n)\}$ (prior sum patent similarity)。若满足 $P_j^{U_1}$ 的技术影响力 $SS_j^{N_1}$ 大于其在过去 5 年的时间窗口中直接连接的专利集合 $PP_j^{N_0}$ 中的所有专利在未来 5 年专利相似度网络 N_1^j 中影响力的均值，即

$$SS_j^{N_1} > \text{mean} \{PSS_j(1), PSS_j(2), \dots, PSS_j(n)\} \quad (3)$$

则将专利 $P_j^{U_1}$ 识别为突破性技术。其中， n 代表 PSS_j 的长度。

需要说明的是，部分研究还考虑了突破性技术创新的独特性^[9,18]，即突破性技术创新相对于同期的其他技术创新必须更加新颖。本文提出的方法不

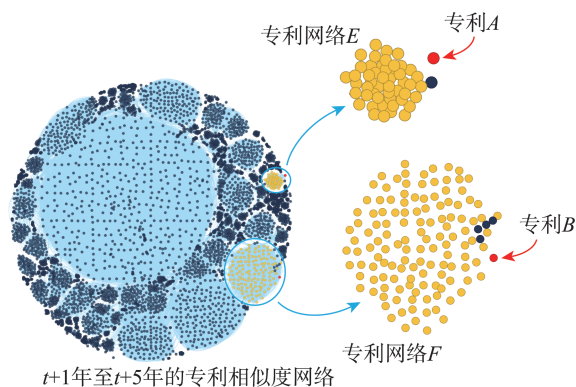


图4 技术影响力计算示意图

考虑独特性的原因是漏判一项突破性技术创新的代价远大于误判^[8], 即此时召回率比精准率更重要。

3 实证研究

3.1 研究数据及来源

本文使用的研究数据来源于国家知识产权局 (<https://www.cnipa.gov.cn>), 涵盖中国制造业企业在1996—2023年申请的112377项已获授权的发明专利数据。早期的专利申请量过少, 故筛选申请年份为

2005—2023年的111317项授权发明专利进行研究。为适应复杂网络构建的动态识别过程, 以前后5年为窗口进行滑动构建专利相似网络, 最终本文聚焦于申请年份为2010—2018年、来自982家中国制造业企业的61431项发明专利数据。

3.2 识别结果

基于突破性技术创新的两阶段识别方案, 本文从111317项授权专利中筛选出11981项候选突破性技术创新, 包括9083项独立突破性候选ICI和2898项知识重组突破性候选KRCI, 进一步地, 基于技术影响力计算确定最终3738项突破性技术创新, 识别率为6.085%。从来源看, 独立突破性技术创新IBI和知识重组突破性技术创新KRBI分别有2143项和1595项, 在总体样本中的占比分别为3.488%和2.596%。突破性技术创新在各年度的统计结果及变化趋势如图5所示。其中, 图5a展示了CI、ICI和IBI逐年的数量和结构变化, 图5b展示了CI、KRCI、KRBI逐年的数量和结构变化, 图5c展示了技术创新总量和CI逐年的数量和结构变化。总体上看, 尽管逐年的技术创新数量呈上升趋势, CI、IBI和KRBI的数量均呈下降趋势。

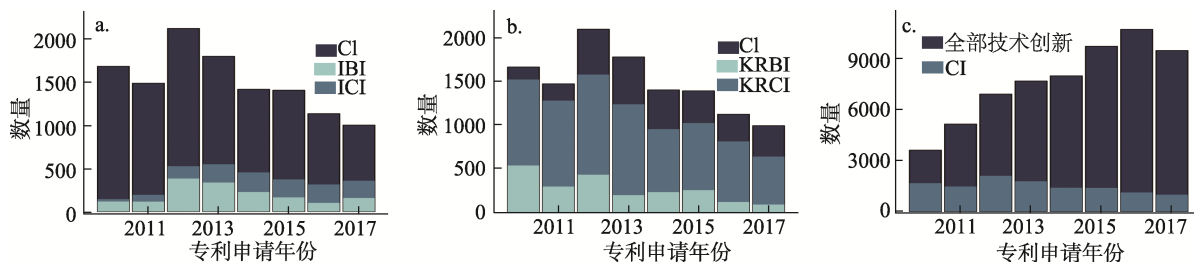


图5 突破性技术创新的识别统计

候选突破性技术创新中产生不同类型突破性成果的概率变化如图6所示。其中, 图6a展示了CI的概率、CI中KRCI和ICI的概率及其变化趋势; 图6b分别描绘了在KRCI和ICI中KRBI、IBI的概率变化趋势。独立候选突破与知识重组候选突破的可能皆呈逐年下降趋势, 从KRCI中产生KRBI概率均值和从ICI中产生IBI的概率均值分别为55.6%和22.2%, 整体来看, 两者均呈下降趋势。尽管ICI的数量要显著多于KRCI, 但其成功识别为突破性技术的占比远低于后者, 这一结论支持创新管理领域中的知识重组理论, 即实现知识重组的技术创新更有可能成为突破性技术创新^[19,33]。此外, 这一结论与Hargadon^[34]的突破性创新理论相契合, 即建立在

全新知识基础之上的突破性创新只是少数, 更多的突破性创新是基于对现有知识的重新组合和集成而实现的。

3.3 内容分析

3.3.1 技术重要性分析

为揭示本文识别突破性技术创新涉及的技术领域, 提取识别结果的IPC分类号子类进行可视化分析, 共覆盖307个IPC子类。统计各IPC子类之间的共现关系绘制共现网络如图7所示。其中, 节点大小代表出现频率, 边的粗细代表两个节点的共现次数。发现F25D、F21V、A47L等IPC子类频数较高且占据网络中心位置, 涵盖光电元件、温控系

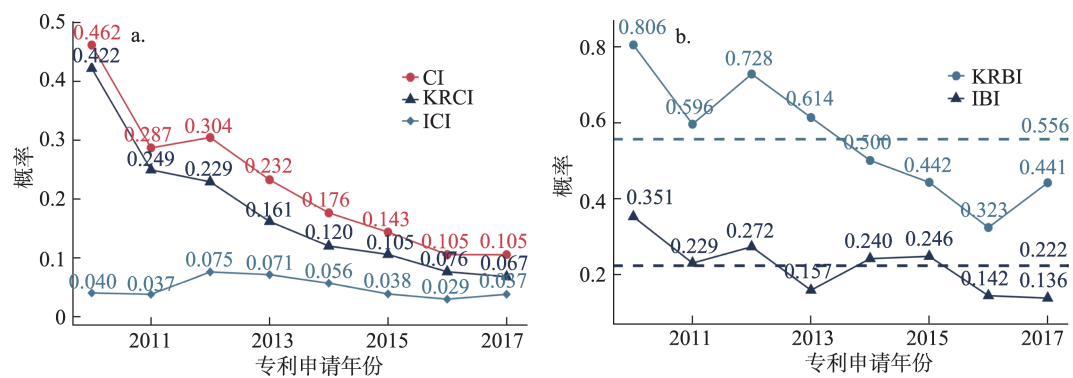


图6 突破性技术创新的识别概率
虚线表示均值水平。

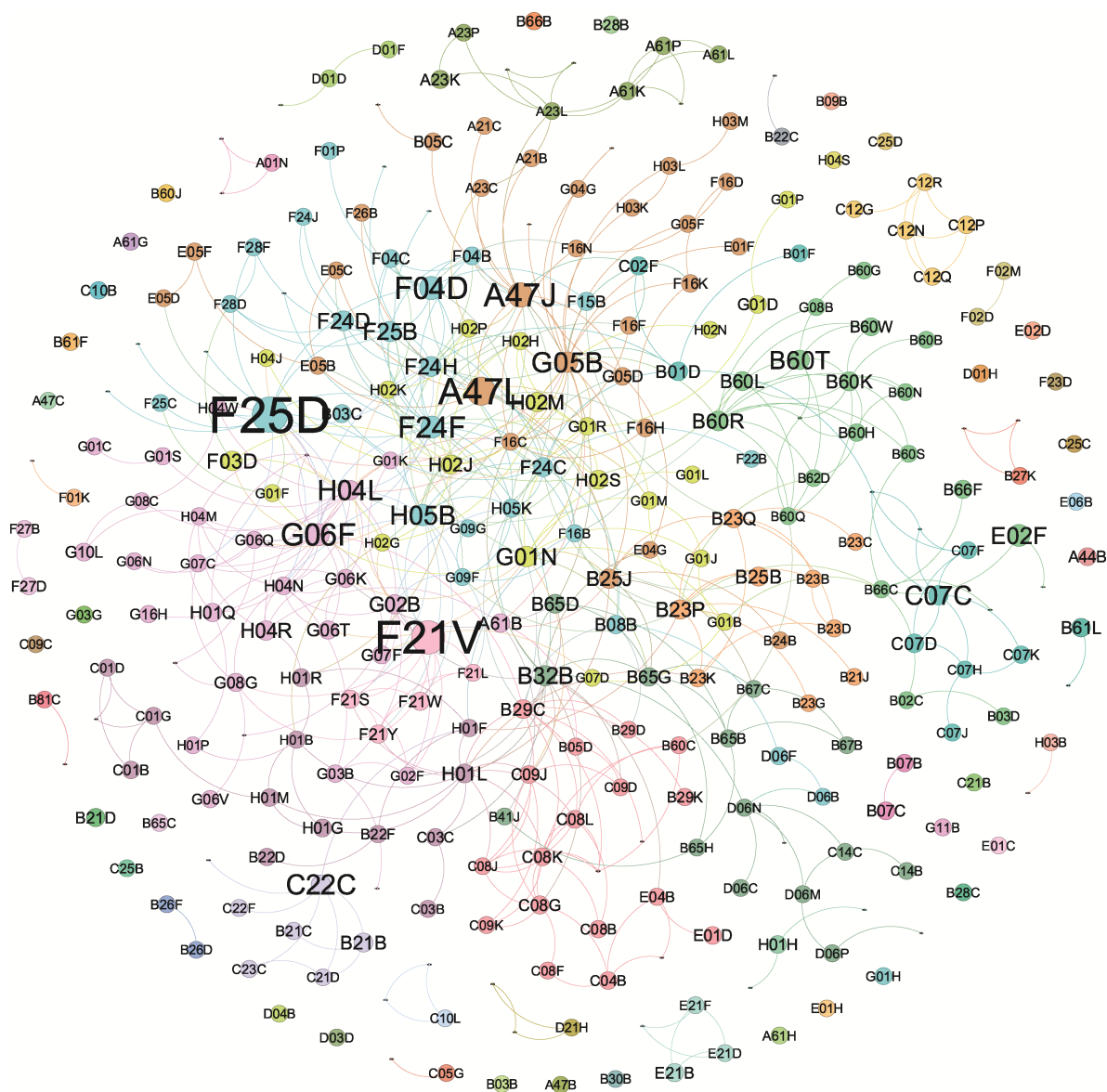


图7 识别结果的IPC分类号共现网络

统、控制调节系统、电数字数据处理等技术领域，多为当年高技术制造业的前沿领域。以网络中各节点的度中心性反映技术的重要性，展示排名靠前的结果及案例如表 1 所示。

表 1 高重要性节点及其案例

排序	IPC 子类	技术领域	代表性案例
1	F24F	空气调节装置和部件	节能厨房空调及其控制方法,他引 49 次
2	G05B	控制或调节系统	扫地机器人的控制方法、系统、云服务器和扫地机器人,他引 61 次
3	H04L	数字信息传输和通信	基于人脸识别的电子数据保护方法、装置及系统,他引 55 次
4	G06F	电数字数据处理	一种远程在线监控系统中设备自升级方法,他引 83 次
5	H02J	电路装置和电能存储系统	一种电动汽车车载双向充电机,他引 43 次

3.3.2 主题分析

发现突破性技术创新的技术主题有助于行业资源调配和政策制定。本文通过 LDA 主题模型分析识别结果的具体内容。根据主题困惑度和主题一致性指标,确定最优主题数量为 6 个,对识别结果的摘要内容进行主题建模并抽取各主题下概率最高的 12 个关键词。基于关键词和专利样本对主题进行归纳和概括,得到的 6 个突破性技术创新主题及关键词如表 2 所示。

其中,主题 1 涉及车辆控件和智能传感系统,在车辆电子系统中占据重要地位,应用场景涵盖汽车自动驾驶等;主题 2 涉及机械动力装置,旨在实现精确能效调整 and 性能突破;主题 3 聚焦复合材料制备,旨在通过创新制备方法改善材料性能;主题

4 下的技术创新集中为光电元件和智能温控系统,旨在通过电路模块和转换装置提高设备的控制精度和能效;主题 5 集中于光学系统和成像器件,主要是高精度光学元件设计和应用。最后,主题 6 下的技术创新集中在流体控制方面,涉及对流体动力系统的控制及优化。

综上,本文识别的突破性技术创新涉及的相关主题涵盖新能源汽车、自动驾驶、流体燃料、温控系统等近年来我国制造业的多个关键核心技术领域,具有高技术水平和高市场应用价值的特征,体现了识别结果的前瞻性和重大性。

对各年份的识别结果分组进行 LDA 主题建模,以揭示突破性技术创新主题的演化模式,结果如表 3 所示。可见早期(2010—2012 年)的突破性技术

表 2 突破性技术创新的主题建模结果

[主题编号] 主题概括	关键词
[1] 车辆控件及智能传感系统	控制 系统 信号 检测 模块 单元 数据 信息 车辆 控制器 接收 传感器
[2] 高精度机械动力装置	组件 结构 壳体 灯具 支架 转动 驱动 叶片 压缩机 底座 调节 弹性
[3] 复合材料与表面技术	制备 材料 化合物 表面 热泵 天线 金属 树脂 产品 吸收式 结构 技术
[4] 光电元件和智能温控系统	控制 电路 温度 模块 加热 LED 驱动 输出 单元 光源 电源 电压
[5] 光学系统和成像器件	结构 透镜 光源 部件 元件 反射器 弹性 活塞 光线 油缸 技术 轴承
[6] 流体控制设备和元件	组件 箱体 通道 门体 结构 定位 图像 蒸汽 系统 滤芯 技术 空间 方便

表 3 各年份的突破性技术创新主题(2010—2017 年)

年份	[主题编号] 主题概括	年份	[主题编号] 主题概括
2010	[1] 光学元件	2014	[1] 语音识别和控制系统
	[2] 光学系统和成像方法		[2] 车辆驱动和图像识别方法
	[3] 智能 LED 照明及远程控制系统		[3] 智能温控装置和系统
	[4] LED 显示屏及触控屏		[4] 电动汽车和混合动力汽车控件
2011	[1] 太阳能光伏和热泵控制系统	2015	[1] 净水和过滤装置
	[2] 动态图像检测和处理方法		[2] 车辆安全控制和自动驾驶
	[3] 风机叶轮组件和控制系统		[3] 变频和节能制冷系统
	[4] 流体控制装置及材料制备		[4] 清洁设备传感系统
	[5] 大型动力机械控制系统	2016	[1] 光伏能源系统
2012	[1] 超高强度(金属)复合材料制备		[2] 智能清洁设备和机器人
	[2] 触摸传感器及近场通信方法		[3] 制冷装置和系统
	[3] 饲料制备和生物工程	2017	[1] 轨道交通自动驾驶和控制组件
2013	[1] 纳米复合材料制备		[2] 电动车辆能源装置
	[2] 声控模组和扬声器(电子)装置		[3] 车辆通信传感系统
	[3] 智能温控装置和系统		
	[4] 混合动力汽车能源及控制系统		

创新主要聚焦于装备研发和先进材料制备，集中在重大工程领域的应用场景；2013—2017年的热点主题包括电动汽车的电池研发、检测和用电优化等，以及混合动力汽车关键器件的研发和优化、智能温控系统等，应用场景主要是交通出行、基础设施、能源管理以及智能生活。

3.3.3 技术案例分析

为了验证突破性技术创新识别结果的准确性，本文挑选了来自材料科学、通信技术、能源技术等不同制造领域的6项典型专利作为案例，分析其在实际应用中的成效，以验证其技术及市场价值。这

些技术专利皆为历史数据，因此，通过进一步分析各自的技术优势、技术细节和获奖情况来评估技术在行业内的影响力，具体结果如表4所示。例如，“一种铁基非晶合金宽带及其制造方法”（CN102314985B）是安泰科技于2011年申请的专利，其作为非晶合金快速凝固技术领域的新型材料突破，可以大幅降低变压器的运行能耗，目前在配电变压器领域得到了广泛应用，并获得第十六届中国专利奖金奖。其他的代表性专利自提出以来皆受到了市场的广泛关注，验证了识别结果不仅在技术层面满足了新颖性、影响力等要求，还拥有较高的市场价值。

表 4 典型专利及其获奖情况

专利名称	申请年份	专利奖	技术优势	创新类型
一种近距离通信方法及系统	2010	2017年金奖	无线通信技术,增强信号稳定性,提升数据传输速率	技术突破,优化了近距离通信的有效性和便捷性
快速制浆的豆浆机	2010	2015年金奖	家电技术,缩短制浆时间,提高能效,简化操作	技术突破,创新豆浆机制浆方法,极大提高速度和效率
一种铁基非晶合金宽带及其制造方法	2011	2014年金奖	新型材料,提高材料强度,扩展应用领域	技术突破,发展了新的非晶合金材料及其制造技术
一种非连续石墨烯包覆的锂离子电池电极材料	2011	2022年优秀奖	能源存储技术,增加电池寿命,提升充电效率	技术突破,通过改进电极材料的包覆技术增强电池性能
一种液晶玻璃基板的生产方法	2016	2018年金奖	材料加工技术,提高生产效率,降低成本	方法创新,改进了液晶玻璃基板的制造过程
一种 MPPT 集中模式退出、切换方法及其相关应用	2014	2022年银奖	清洁能源技术,提高系统响应速度并改进了光伏系统的能效	方法创新,改进了光伏系统的能效和性能管理

准确识别突破性技术创新对于行业内的技术预见和技术政策制定起着至关重要的作用。为了验证所识别的突破性技术创新是否真的满足突破性特征，借鉴文献[6]，通过问卷调查方式邀请行业内的技术专家、技术创新管理领域资深学者进行专家评审，对上述6项代表性专利提供更全面的创新评估，主要涉及专利的技术背景、关键词、摘要内容、权利要求书等信息。调查问卷采用李克特五级量表，评分等级从1级（突破性非常低）到5级（突破性非常高）。本次问卷发放共27份，有效回

收问卷共25份，回收率为92.6%，反映了参与专家对本文研究主题的高度兴趣和认可。评审专家中研究生及以上学历的占比达到85%，确保了评估的专业性和权威性。最终统计汇总专家对6项代表性专利的评分结果如表5所示。

由表5可以发现，典型专利的评分大多集中在4级，表明本文识别结果与专家评价基本一致。其中“一种非连续石墨烯包覆的锂离子电池电极材料”（CN102412396B）和“一种铁基非晶合金宽带及其制造方法”（CN102314985B）均属于新材料技

表 5 专家评审结果统计

专利名称	1级(%)	2级(%)	3级(%)	4级(%)	5级(%)	平均分	标准差
一种近距离通信方法及系统	3.0	8.0	20.0	48.0	22.0	4.2	0.8
一种铁基非晶合金宽带及其制造方法	0.0	0.0	12.0	40.0	48.0	4.6	0.5
快速制浆的豆浆机	4.0	20.0	36.0	28.0	12.0	3.5	1.0
一种非连续石墨烯包覆的锂离子电池电极材料	0.0	0.0	4.0	36.0	60.0	4.8	0.4
一种液晶玻璃基板的生产方法	4.0	16.0	28.0	40.0	12.0	3.7	0.7
一种 MPPT 集中模式退出、切换方法及其相关应用	0.0	4.0	24.0	44.0	28.0	4.3	0.6

术突破,取得了极高的评分,平均分分别为4.8和4.6,被引次数分别为22和42。

其中,平均得分最低的专利为“快速制浆的豆浆机”(CN102204789B),多数专家认为其突破性水平一般,尽管在制浆方法层面提高了豆浆机的效率,但这种性能创新易被视为技术优化而非根本性突破。从本文对突破性技术创新的定义出发,突破性的产生并非完全是对全新领域的开辟,也可能来源于对现有知识的深度重组与融合,该专利基于通过对制浆机内部流程的重新设计,包括精准控温和全新的研磨系统,大幅度提高成浆性能,提高了约250%的制浆效率。这种工艺创新源于对现有技术流程的深入分析和重新组合进而创造出新的工作模式,颠覆了传统产品的技术范式,极具市场价值,最终获得第十七届中国专利奖金奖。这进一步验证了本文提出的两阶段方法在挖掘突破性技术创新上的有效性。

3.4 结果检验

3.4.1 经济后果检验

技术演化周期理论认为,特定技术领域中的突破性技术创新倾向于在技术累积量的S形曲线的前端迸发式出现,其经济后果在于带动整个技术领域产品及市场的快速发展^[8,15]。以专利首位IPC子类代表其主要技术领域,选取频次最高的IPC子类F24F,即空气调节装置制造为焦点领域进行分析。以授权专利代表技术产品,共得到8230项与空调、冰箱等制冷设备及其上下游产业有关的技术产品,识别区间内有76项突破性技术创新,其中超过95%归属于格力电器和美的集团两大行业巨头。以横轴为专利申请日,纵轴为按周统计的专利数量,若当周内出现突破性技术创新,则将其标注为“是”,最终得到如图8所示的新增产品数量曲线。

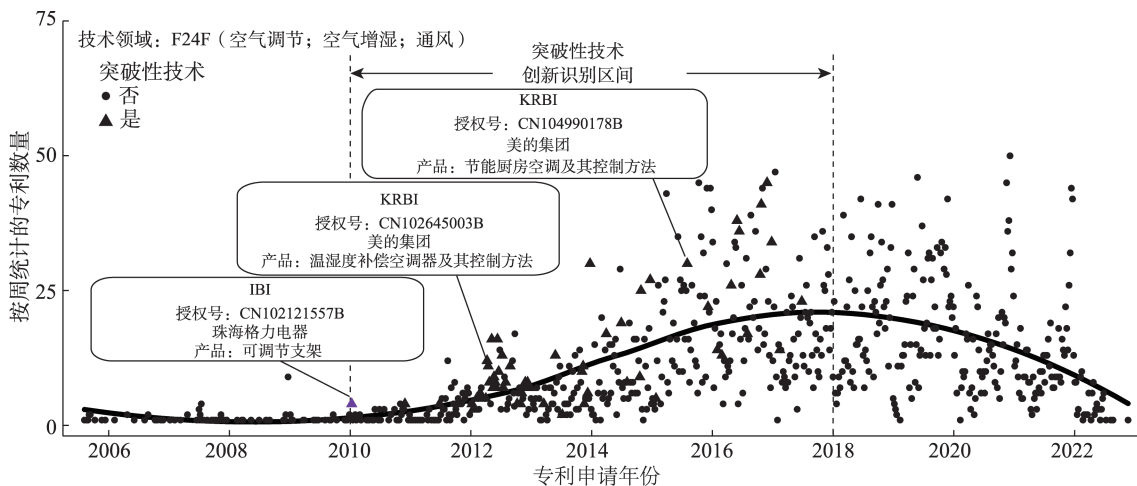


图8 F24F技术领域的新增产品数量曲线

由图8可以发现,新增产品数量在2008年跌至最低,随后保持正增长,2018年左右达峰值后趋于平缓,基本符合技术演化周期理论。本文识别的突破性技术创新主要在2011—2014年迸发,同样是该领域新产品涌现速度最快的时间段。F242技术领域识别出的第一个突破性技术创新为珠海格力电器研发的一种可调节支架(CN102121557B),主要用于在复杂墙体上支撑空调外机,应用非常广泛。该技术被识别为IBI,其在该技术领域引入了两种全新的IPC分类号知识:F24F13/32和F16M13/02。2010年后,格力电器在该领域的绩效占据绝对优势,其研发的产品多为独立型突破性技术创新。

同年,美的集团从家用厨具(如豆浆机等)领

域进入该技术领域,其产品多为跨界的知识重组型突破性技术创新。例如,专利节能厨房空调及其控制方法(CN104990178B)特别研发了一种针对传统空调不适于厨房环境的解决方案,目前其被引量已达48次;温湿度补偿空调器及其控制方法(CN102645003B)提出了一种通过温湿度传感器实现自动调节温度的方法,目前被引量达24次。上述技术专利对后续空调的技术范式产生了极大影响,并帮助美的集团在该领域快速建立了竞争优势,使其在短期内成长为能够同珠海格力电器相抗衡的行业巨头。

为进一步检验上述结论的适用性,绘制产品累积曲线,如图9所示。可以发现,F24F领域的产品

累积曲线基本呈 S 形，符合技术演化周期理论。本文的识别结果迸发于曲线前端，而该技术领域的产品迸发产生于首个突破性技术创新出现后、集中于突破性技术创新的迸发期后，这初步证明了本文识别结果的出现对于市场及产品发展的促进作用。

进一步地，参考 Capponi 等^[8]的研究进行该结论的适用性检验。首先，得到 3952 个 IPC 子类代表的

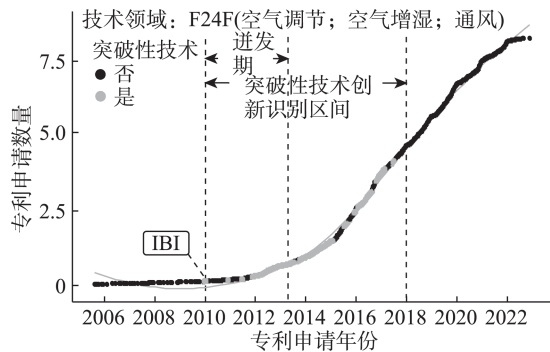


图9 F24F 技术领域的产品累积曲线

技术领域，统计并补全各技术领域各年的专利授权量，最终得到 67184 个技术领域-专利授权量-年份样本。采用变量 breakthrough year 来标记产生突破性技术创新的年份，并延长 L 年以观测其影响。分别设置延长期为 3 年（短期）和 5 年（长期），加入线性年份趋势变量（year trend）和二次年份趋势变量（year trend²）以探索时间效应。此外，固定行业效应 technology dummies 为 IPC 子类，同时在参数估计的稳健标准误中以其聚类控制残差自相关问题，回归结果如表 6 所示。

为检验上述实验的稳健性和敏感性，同时排除识别区间带来的主观偏差，设置安慰剂实验进行检验。将产生突破性技术创新的年份向前推动 5 年^[8]，例如，若突破性技术创新在 2010 年产生，那么安慰剂变量将假定其产生于 2005 年，规定安慰剂产生的时间不得早于 2005 年。标记安慰剂变量为 *breakthrough year，并再次执行回归，结果如表 7 所示。

表 6 基于技术演化周期理论的有效性检验结果

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
专利授权数量	系数(标准误)	系数(标准误)	系数(标准误)	系数(标准误)	系数(标准误)	系数(标准误)
	($L = 3$)	($L = 3$)	($L = 3$)	($L = 5$)	($L = 5$)	($L = 5$)
breakthrough year	4.560***	4.653***	4.220***	4.815***	4.399***	4.322***
(1=true)	(0.604)	(0.640)	(0.666)	(0.635)	(0.575)	(0.662)
year trend	—	0.722***	1.000***	—	0.661***	0.706***
		(0.095)	(0.136)		(0.088)	(0.143)
year trend ²	—	—	-0.029*	—	—	-0.005
			(0.002)			(0.015)
technology dum-mies	控制	控制	控制	控制	控制	控制
常量	0.059***	0.059***	0.059***	0.059***	0.059***	0.059***
	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
样本量	67184	67184	67184	67184	67184	67184
拟合优度	0.500	0.520	0.520	0.503	0.519	0.519

注：括号内的数字为回归模型参数的稳健标准误；*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$ ，***表示 $P<0.001$ 。

从表 6 可见，变量 breakthrough year 在短期和长期中均对专利授权量有着显著的正向影响，短期中这种影响在二次趋势下显著，长期则在线性趋势下显著。表 7 显示，在所有模型中，*breakthrough innovation 均与专利授权量呈负相关关系，即安慰剂变量不能显著促进同一技术领域专利授权量增加。这表明如果扰乱突破性技术创新产生的年份，那么原先得到的参数估计结果将不再可靠。上述结论说明，本文识别的突破性技术创新具有稳健的经济后果，即促进同一技术领域中产品数量的迸发，从侧

面反映了其对于产品市场的冲击力和颠覆性。

3.4.2 稳健性检验

突破性技术创新必然具有较高的影响力，考虑到现有研究主要通过专利被引量来衡量其技术影响力，为验证识别结果的未来影响力，本文构建以识别出的突破性技术创新（breakthroughs）为核心解释变量、以专利被引量（citations）为被解释变量的线性回归模型。参考现有研究^[8]，选择专利权利要求项数（claims）、专利权发明人数（inventors）、同族专利数（family size）为控制变量（controls），同

表 7 安慰剂环境下的有效性检验结果

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
专利授权数量	系数(标准误) ($L = 3$)	系数(标准误) ($L = 3$)	系数(标准误) ($L = 3$)	系数(标准误) ($L = 5$)	系数(标准误) ($L = 5$)	系数(标准误) ($L = 5$)
*breakthrough year ($1=true$)	-5.661*** (0.742)	-2.973** (-3.046)	-3.011*** (0.483)	-3.536*** (0.107)	-0.453* (0.212)	-1.014*** (0.195)
year trend	—	0.449*** (0.052)	0.937*** (0.103)	—	0.563*** (0.071)	1.078*** (0.113)
year trend ²	—	—	-0.033*** (0.006)	—	—	-0.037*** (0.006)
technology dum- mies	控制	控制	控制	控制	控制	控制
常量	0.059*** (0.000)	0.059*** (0.000)	0.059*** (0.000)	0.059 (1.468)	0.059*** (0.000)	0.059*** (0.000)
样本量	67184	67184	67184	67184	67184	67184
拟合优度	0.504	0.514	0.516	0.495	0.511	0.519

注:括号内的数字为回归模型参数的稳健标准误;*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$ 。

时,固定年份效应(year dummies)和技术领域效应(technology dummies)。经检验,变量间的方差膨胀因子均小于2,认为模型不存在多重共线性问题。回归结果如表8所示。其中,模型1仅包含控

制变量,模型2中加入如式(3)所示的技术影响力(technology influence)变量,模型3则加入了核心解释变量。结果显示,本文识别的突破性技术创新及构建的技术影响力指标均与被引量显著正相关。

表 8 基于专利被引量稳健性检验的 OLS 回归结果

专利被引量	模型 1 系数(标准误)	模型 2 系数(标准误)	模型 3 系数(标准误)
breakthroughs ($1=true$)	—	—	0.086*** (0.017)
technology influence	—	0.037*** (0.005)	—
claims	0.118*** (0.015)	0.116*** (0.015)	0.116*** (0.015)
inventors	0.024*** (0.003)	0.025*** (0.003)	0.025*** (0.003)
family size	-0.007 (0.031)	0.003 (0.031)	-0.002 (0.031)
year dummies	控制	控制	控制
technology dummies	控制	控制	控制
常量	1.260*** (0.053)	1.182*** (0.053)	1.218*** (0.053)
样本量	11981	11981	11981
拟合优度	0.036	0.040	0.038

注:括号内的数字为回归模型参数的稳健标准误;*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$;除分类变量外,其他变量皆经过对数化处理。

此外,鉴于部分研究通过设置被引量阈值来定义突破性技术创新,本文分别选择被引量前 ε 位的专利构建基于被引量的突破性技术创新指标(breakthrough innovation, BI),并进行 Logit 回归以

检验识别结果的稳健性,结果如表9所示。可以发现,相同的结论在以被引量前 1%、2%、3%、5%和 7% 的专利为突破性结果的 Logit 回归中同样成立,进一步验证了识别结果的稳健性和有效性。

表 9 基于专利被引量稳健性检验的 Logit 回归结果

突破性技术创新 (1=true)	模型 1 系数(标准误)($\varepsilon = 1\%$)	模型 2 系数(标准误) ($\varepsilon = 2\%$)	模型 3 系数(标准误) ($\varepsilon = 3\%$)	模型 4 系数(标准误) ($\varepsilon = 5\%$)	模型 5 系数(标准误) ($\varepsilon = 7\%$)
breakthroughs (1=true)	0.422* (0.183)	0.344** (0.128)	0.351*** (0.106)	0.337*** (0.089)	0.270*** (0.077)
claims	0.813*** (0.212)	0.608*** (0.135)	0.543*** (0.107)	0.440*** (0.085)	0.352*** (0.072)
inventors	0.070 (0.037)	0.233 (0.170)	0.061*** (0.019)	0.052*** (0.015)	0.049*** (0.013)
family size	0.312 (0.209)	0.066** (0.022)	0.325* (0.136)	0.385*** (0.114)	0.264* (0.105)
year dummies	yes	yes	yes	yes	yes
technology dummies	yes	yes	yes	yes	yes
常量	-6.585*** (0.666)	-5.242*** (0.431)	-4.569*** (0.348)	-4.077*** (0.276)	-3.515*** (0.238)
样本量	11981	11981	11981	11981	11981
伪 R^2	0.051	0.031	0.029	0.028	0.025
卡方统计量对应的 P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注：Logit 回归的参数估计具有稳健的标准误；*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$ ，***表示 $P<0.001$ ；除分类变量外，其他变量皆经过对数化处理。

4 总 结

本文基于专利相似性网络和完整的专利 IPC 分类号信息，提出了一种两阶段过程的突破性技术创新识别方法，综合考虑了突破性技术创新的独立和知识重组两类来源特征以及技术影响力，用于实现对中国制造业发明专利中的突破性技术创新进行早期识别，并通过内容分析、案例研究、专家评审和数据实验等多种方式，验证了突破性技术创新识别结果的有效性与稳健性。

首先，构建专利相似性网络筛选具备独立性和知识重组性的突破性候选专利，通过事后评价测度相对影响力以识别突破性技术创新，发现在 61431 项授权发明专利中产生突破性技术创新 3738 项，占比为 6.085%，这与现有研究的识别概率相一致^[9]。其中，独立突破性技术创新和知识重组突破性技术创新分别有 2143 项和 1595 项，占比分别为 3.488% 和 2.596%。这一结论支持突破性技术创新中的知识重组理论^[33]以及 Hargadon^[34]的突破性创新理论，即相较于独立型技术创新，实现知识重组的技术创新更易成为突破性技术创新。其次，通过 IPC 分类号的网络重要性、主题模型提炼海量专利的突破性技术方向，发现早期的突破性技术创新主要聚焦于装备研发和先进材料制备，集中在重大工程领域的应用场景，2013 年逐渐趋向于电动汽车的电池技术研发、检测和用电优化。再其次，通过典型突破性专

利案例分析、专家评审等方式，发现本文方法能够有效甄别极具市场价值的突破性技术创新。最后，针对制造业授权专利最集中的 IPC 子类 F24F 代表的技术领域案例进行分析，发现本文的识别结果主要聚集于技术演化曲线的前端，即产品数量激增前期，符合技术演化周期理论，统计意义上该结论在各不同技术领域的检验中均成立，进一步结合实证模型验证了本文识别的突破性技术创新结果的有效性。

本文的主要贡献如下：①在技术跃迁理论和知识重组理论基础上，提出了一种基于动态复杂网络的突破性技术创新两阶段识别方法，将技术新颖性和技术影响力作为识别特征，从专利相似性网络视角提出了能够有效区分独立性和知识重组特征的两类突破性技术，丰富和拓展了突破性创新理论研究，为后续关于突破性技术创新的实证检验提供了理论参考；②将实证识别结果与技术获奖情况、专家评分和实证检验结果等进行多重验证对比，进一步支撑识别结果的稳健性与有效性，为中国制造业的突破性技术研发方向与主题演化提供了识别方案和思路，助力关键核心技术的方向解读，具有一定的实践价值。

尽管如此，本文也存在一些不足之处。首先，具有一定的时空限制，本文提出的识别方法依赖于时间窗口，可获得的专利信息依然是历史数据，未来可以根据识别结果对突破性技术进行特征提取并构建基于当下专利数据的实时预见模型。其次，该

方法具有较大的计算复杂度,专利相似度网络及遍历生成增广网络的过程依赖巨量的计算资源,未来可考虑进一步优化网络相关算法,以实现轻量化和封装的识别方法。最后,本文识别方法以专利相似性为基础,理论上适用于在专利知识差异大的跨领域样本中识别突破性技术创新,而在技术迭代速度较慢或专利活动较少的场景中可能效果欠佳,后续研究可进一步引入专利的商业价值,弥补仅通过专利来识别突破性技术创新的局限,进一步揭示突破性技术创新的形成过程及技术影响。

参考文献

- [1] 林春培,朱晓艳,余传鹏,等. 跨界团队网络特征对其颠覆性创新绩效的影响研究[J]. 情报学报, 2024, 43(4): 391-404.
- [2] 陈傲,柳卸林. 突破性技术从何而来?——一个文献评述[J]. 科学学研究, 2011, 29(9): 1281-1290.
- [3] Zheng Y F, Yang H B. Does familiarity foster innovation? The impact of alliance partner repeatedness on breakthrough innovations [J]. *Journal of Management Studies*, 2015, 52(2): 213-230.
- [4] Bakker J, Verhoeven D, Zhang L, et al. Patent citation indicators: one size fits all?[J]. *Scientometrics*, 2016, 106(1): 187-211.
- [5] 张金柱,张晓林. 利用引用科学知识突变识别突破性创新[J]. 情报学报, 2014, 33(3): 259-266.
- [6] 王康,陈悦,王玉奇,等. 基于专利引用变化的颠覆性技术识别研究[J]. 情报杂志, 2022, 41(1): 74-80, 169.
- [7] 任海英,邵文,李欣. 基于专利内容新颖性和常规性的突破性发明影响因素和研发策略分析[J]. 情报杂志, 2019, 38(2): 56-63.
- [8] Capponi G, Martinelli A, Nuvolari A. Breakthrough innovations and where to find them[J]. *Research Policy*, 2022, 51(1): 104376.
- [9] 马荣康,王艺棠. 基于专利相似度的突破性技术发明识别研究——以纳米技术为例[J]. 科研管理, 2021, 42(5): 153-160.
- [10] Caviggioli F. Technology fusion: identification and analysis of the drivers of technology convergence using patent data[J]. *Technovation*, 2016, 55-56: 22-32.
- [11] Small H, Boyack K W, Klavans R. Identifying emerging topics in science and technology[J]. *Research Policy*, 2014, 43(8): 1450-1467.
- [12] Fritsch M. The theory of economic development – an inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle[J]. *Regional Studies*, 2017, 51(4): 654-655.
- [13] 丁乐蓉,石静,吴柯烨,等. 技术团队跨学科性对突破性创新的影响研究[J]. 情报学报, 2024, 43(5): 503-515.
- [14] 余博文,刘向. 突破式创新发明人的合作倾向[J]. 情报学报, 2024, 43(3): 251-260.
- [15] Golder P N, Shacham R, Mitra D. Findings—innovations' origins: when, by whom, and how are radical innovations developed?[J]. *Marketing Science*, 2009, 28(1): 166-179.
- [16] Haupt R, Kloyer M, Lange M. Patent indicators for the technology life cycle development[J]. *Research Policy*, 2007, 36(3): 387-398.
- [17] Castaldi C, Frenken K, Los B. Related variety, unrelated variety and technological breakthroughs: an analysis of US state-level patenting[J]. *Regional Studies*, 2015, 49(5): 767-781.
- [18] Dahlin K B, Behrens D M. When is an invention really radical? Defining and measuring technological radicalness[J]. *Research Policy*, 2005, 34(5): 717-737.
- [19] Dosi G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change[J]. *Research Policy*, 1982, 11(3): 147-162.
- [20] Simonton D K. The blind-variation and selective-retention theory of creativity: recent developments and current status of BVSR[J]. *Creativity Research Journal*, 2023, 35(3): 304-323.
- [21] Fleming L. Recombinant uncertainty in technological search[J]. *Management Science*, 2001, 47(1): 117-132.
- [22] Kaplan S, Vakili K. The double-edged sword of recombination in breakthrough innovation[J]. *Strategic Management Journal*, 2015, 36(10): 1435-1457.
- [23] Anderson P, Tushman M L. Technological discontinuities and dominant designs: a cyclical model of technological change[J]. *Administrative Science Quarterly*, 1990, 35(4): 604-633.
- [24] Walshok M L, Shapiro J D, Owens N. Transnational innovation networks aren't all created equal: towards a classification system [J]. *The Journal of Technology Transfer*, 2014, 39(3): 345-357.
- [25] Chandy R K, Tellis G J. The incumbent's curse? Incumbency, size, and radical product innovation[J]. *Journal of Marketing*, 2000, 64(3): 1-17.
- [26] Schoenmakers W, Duysters G. The technological origins of radical inventions[J]. *Research Policy*, 2010, 39(8): 1051-1059.
- [27] 韩芳,张生太,冯凌子,等. 基于专利文献技术融合测度的突破性创新主题识别——以太阳光伏领域为例[J]. 数据分析与知识发现, 2021, 5(12): 137-147.
- [28] Aharonson B S, Schilling M A. Mapping the technological landscape: measuring technology distance, technological footprints, and technology evolution[J]. *Research Policy*, 2016, 45(1): 81-96.
- [29] Sood A, Tellis G J. Technological evolution and radical innovation[J]. *Journal of Marketing*, 2005, 69(3): 152-168.
- [30] 苏屹,林周周,欧忠辉. 基于突变理论的技术创新形成机理研究[J]. 科学学研究, 2019, 37(3): 568-574.
- [31] Funk R J, Owen-Smith J. A dynamic network measure of technological change[J]. *Management Science*, 2017, 63(3): 791-817.
- [32] Arthur W B. The structure of invention[J]. *Research Policy*, 2007, 36(2): 274-287.
- [33] Singh J, Fleming L. Lone inventors as sources of breakthroughs: myth or reality?[J]. *Management Science*, 2010, 56(1): 41-56.
- [34] Hargadon A. How breakthroughs happen: the surprising truth about how companies innovate[M]. Boston: Harvard Business School Press, 2003.

(责任编辑 魏瑞斌)