

现代情报
Journal of Modern Information
ISSN 1008-0821, CN 22-1182/G3

《现代情报》网络首发论文

题目: 基于 SAO 的全景技术演化路径识别及其创新类型分析
作者: 王金凤, 常瑜, 张珂, 冯立杰, 周炜
收稿日期: 2024-08-07
网络首发日期: 2024-10-17
引用格式: 王金凤, 常瑜, 张珂, 冯立杰, 周炜. 基于 SAO 的全景技术演化路径识别及其创新类型分析[J/OL]. 现代情报.
<https://link.cnki.net/urlid/22.1182.G3.20241017.1035.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 SAO 的全景技术演化路径识别及其创新类型分析
Panoramic Technology Evolution Path Identification and Its Innovation Type
Analysis Based on SAO Semantic Analysis

王金凤^{1,2} 常瑜¹ 张珂³ 冯立杰^{4*} 周炜⁵
Wang Jinfeng^{1,2} Chang Yu¹ Zhang Ke³ Feng Lijie^{4*} Zhou Wei⁵

(1. 郑州大学管理学院, 河南 郑州 450001; 2. 上海海事大学中国(上海)自贸区供应链研究院, 上海 201306; 3. 郑州大学信息管理学院、郑州市数据科学研究中心, 河南 郑州 450001; 4. 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306; 5. 武汉大学信息管理学院, 湖北 武汉 430072)
(1. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. China Institute of FTZ Supply Chain, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. School of Information Management, Zhengzhou University, Zhengzhou Research Center of Data Science, Zhengzhou 450001, China; 4. School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 5. School of Information Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: [目的/意义] 开展目标领域技术演化路径识别及创新类型分析, 可为企业制定前瞻性技术创新策略提供实现方法支持。[方法/过程] 首先, 本文采用 SAO 语义分析方法准确识别了技术节点, 并以多维技术创新地图的创新维度导航, 借助朴素贝叶斯分类器实现技术节点的自动归维; 其次, 根据技术节点间的语义相似度及其涉及的创新法则, 构建了全景技术演化路径; 最后, 利用技术邻近度指标与创新周期指标, 研判了技术演化路径的创新类型。[结果/结论] 以石墨负极材料制备技术为例, 剖析了该技术的技术演化路径及其创新类型, 验证了本文所提方法的可行性。

关键词: 技术演化路径; 创新类型; SAO 语义分析; 朴素贝叶斯; 多维技术创新地图
分类号: G353.1

Abstract: [Purpose/Significance] Carrying out the identification of technology evolution paths and analysis of innovation types in target areas can provide realization method support for enterprises to formulate forward-looking technological innovation strategies. [Method/Process] Firstly, the study adopted SAO semantic analysis method to accurately identify the technology nodes, and took the innovation dimensions of multi-dimensional technology innovation map as the navigation to realize the automatic dimension partitioning of technology nodes with the help of naive Bayes classifier. Secondly, the study constructed the panoramic technology innovation map based on the semantic similarity between technology nodes and the innovation laws they involved. Thirdly, the study used technology proximity index and innovation cycle index to analyze the innovation type of technology evolution path. [Result/Conclusion] By taking the preparation technology of graphite anode material as an example, this article analyzes the technology evolution path and its innovation type, thus verifying the feasibility of the method proposed in this paper.

Key words: technology evolution path; innovation type; SAO semantic analysis; naive Bayes; multi-dimensional technology innovation map

科学知识体系的日益庞大与精细, 加之不同学科领域的交叉融合, 给技术创新带来了前所未有的挑战^[1]。而技术演化路径作为梳理技术创新发展脉络的重要工具, 有助于在甄

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 河南省二〇二四年科技发展计划-河南省软科学研究 “创新驱动高质量发展下河南省专精特新企业核心技术突破机制及创新路径研究” (项目编号: 242400410330); 国家自然科学基金面上项目 “多维度-多法则耦合的关键核心技术创新区域识别与创新路径选择研究” (项目编号: 72371155)。

作者简介: 王金凤 (1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 工业工程与创新方法。常瑜 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 技术创新。张珂 (1994-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 产品创新; 周炜 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 技术创新、应急情报分析。

通信作者: 冯立杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 技术创新与管理。

别技术创新发展方向的同时，高效推动核心技术的研发^[2]。因此，如何借助技术演化路径进行技术演化规律的探究及技术创新机会的预测，日益成为技术情报分析领域的热点议题。

对此，众多学者采用文献计量方法、社会网络分析方法及文本挖掘等方法，围绕精准识别技术演化路径开展了大量研究^[3]。

基于文献计量的方法，主要通过计量指标、共现及共引分析等工具，对技术演化过程进行剖析。如 Gao L D 等^[4]建立了一个根据多种专利相关指标计算目标技术生命周期的模型。Liu H L 等^[5]提出了共被引分析的概念，并通过文献引用进行技术演化分析。

基于社会网络分析的方法，主要通过挖掘论文或专利文本间的引用关系，形成了引文网络以梳理技术发展脉络。如 Liu H L 等^[5]在构建人工智能领域技术引文网络基础上，结合主题模型识别了人机交互技术演化主路径。Kim J 等^[6]利用主路径分析法识别了高压直流输电技术的主要技术路径。

基于文本挖掘的方法，主要通过关键词或主题模型挖掘专利、论文等文献的文本语义信息，以了解目标技术领域的发展态势。如 Zhang Y 等^[7]利用 TF-IDF 方法通过聚类相关术语和短语以提取技术主题，进而预测了科学技术的发展趋势。Xu H Y 等^[8]采用 LDA 主题挖掘、关键词分析及文献计量指标计算方式，探究了基于科技主题联动的创新路径识别方法。

综上所述，现有技术演化路径识别方法为本文提供了参考思路，但仍存在以下不足：首先，在技术节点归维方面，已有文献大多依赖于人工进行识别，虽然能在一定程度上确保准确性，但耗时较长且易受主观因素的影响；其次，在技术演化路径构建方面，已有文献虽基于技术节点间的语义相似度探寻了技术节点之间的联系，但较少对技术节点间演化关系的内在逻辑进行细粒度剖析，导致构建的技术演化路径难以为技术预测提供深度诠释与前瞻性指导；最后，在技术演化路径拓展应用方面，已有文献大多停留在对技术演化路径的简单预测层面，较少结合不同创新类型特点对路径进行细致区分，忽略了不同类型技术演化路径创新策略之间的差异性，难以为企业针对不同类型的技术创新提供具体指导。

为弥补现有研究的不足，本文运用了朴素贝叶斯算法实现技术节点的自动归维，基于多维技术创新地图剖析技术节点间的具体演化关系，并建立相应的创新类型指标体系，旨在实现具象领域技术演化路径及其创新类型的准确识别。同时，本文以石墨负极材料制备技术为例开展了应用研究，验证了本文所提方法的可行性。

1 文献综述

1.1 SAO 语义分析方法

SAO (Subject-Action-Object) 结构是从文本语料库中提取的三元组，其中，主语 S (Subject) 和宾语 O (Object) 均为名词，A (Action) 通常用于描述主语和宾语之间的动作或关系^[9]。SAO 语义分析方法通过对上述三要素的准确识别和关联，形成句子的语义结构，进而深化对文本的理解。目前，SAO 语义分析方法被广泛应用于技术机会识别、技术

演化路径识别以及语义相似度计算等领域。如 Li X 等^[10]以论文和专利为数据源，结合 SAO 语义分析方法和离群点检测方法构建了技术机会识别研究框架。Miao H 等^[11]通过从专利文本中提取 SAO 结构并构建技术路线图，识别了老年智能穿戴技术领域技术创新的演变趋势。Wang X F 等^[12]引入 DWSAO 指标量化机器人领域专利文本的 SAO 结构权重，并据此评估了专利之间的相似性。

鉴于此，本文运用 SAO 语义分析方法对目标领域的热点技术开展了技术演化路径识别，从相关专利标题、摘要及权利要求书中提取 SAO 结构并进行筛选，以挖掘目标技术领域专利中的技术信息和关联关系，进而为后续生成全景技术演化路径提供数据支持。

1.2 多维技术创新地图

多维技术创新地图是一种以 9 类创新维度为导航，探寻具体技术领域的创新要素或其表现形态，然后与 9 种创新法则进行耦合，形成一系列创新路径的技术创新方法^[13]。其中，9 类创新维度的含义及其二级子维如表 1 所示。

表 1 创新维度

Tab.1 Dimensions of Innovation

维度	含义	二级子维
空间维	目标系统在空间中的表现与特性	方位、大小、体积、构造等
环境维	目标系统在运作、建造、生物与化学反应过程中涉及的环境参数	温度、光照、有害及有益成分等
结构维	目标系统中零部件之间或与子系统之间的关系	连接方式与层次关系等
功能维	目标系统在解决既定问题的同时达到特定效果的某种能力	生产效能、工作方式等
机理维	目标系统实现特定功能所涉及的知识基础	自然科学基本原理与社会科学基本原理等
材料维	目标系统中归属材料的各种属性	系统材料的构成关系与材料状态等
动力体系维	目标系统在能量传递、转换和储存等过程中涉及各类要素	能量来源及流动方式、能量传递路径与储存方式等
时序维	目标系统中与流程顺序有关的特征	作业顺序、作业时长与作业标准等
人机关系维	目标系统中人一机一环之间的互动关系	人与作业对象、环境、机器设备等之间的关系

9 种创新法则的具体含义如表 2 所示。

表 2 创新法则

Tab.2 Laws of Innovation

创新法则	含义
分解与去除	将目标系统逐层分解为不可再分的最小单元，对冗余组件或有害组件进行分割、分离、去除和抽取以重构系统，达到优化系统性能的目的
组合与集成	将目标系统中具有同种或不同性能的元素或个体结合为一个整体，或将部分独立元素进行组合，形成一个相互联系的整体
局部优化	通过调整部分参数及提升性能等非本质性改变，使目标系统的局部达到最佳状态

替代	通过主被动替代、界内或跨界替代以及高端或低端替代等形式，对目标系统中的技术要素进行更替
动态化	赋予目标系统技术创新要素动态变化的能力
自服务	通过改变目标系统部件之间的关系或添加新部件，使其具有自我服务、自我维护或保护的能力
友好化	考虑人的适应能力及环境安全等因素，重构创新要素与人、环境的交互关系，使其占用资源最少、对人与环境的危害最小
柔性化	对目标系统的空间结构、壳体等要素进行渐进化与平和化处理
智慧化	借助信息化等先进技术及多学科知识智慧管理目标系统

截至目前，多维技术创新地图已经在潜水电机^[14]、3D 打印^[15]、纳米二氧化钛改性技术^[16]、煤矿喷雾除尘^[17]等领域得到了广泛应用。

鉴于此，本文融合 SAO 语义分析方法与多维技术创新地图，对特定领域的技术演化路径展开了识别。具体而言，以创新维度导航，对 SAO 结构表征的技术形态进行归维，而后将其作为技术节点，使用创新法则对节点间的演化关系进行解读与标注，进而构建具象领域的全景技术演化路径，为后续剖析技术演化路径的创新类型奠定基础。

1.3 技术创新的分类

自约瑟夫·熊彼特^[18]于 1991 年首次提出技术创新概念后，众多学者对技术创新的分类展开了大量研究。较为常见的分类方法是根据技术创新活动中的技术变化强度和对象，将其分为渐进性技术创新和突破性技术创新^[19]。其中，渐进性技术创新是在现有技术轨道上对技术的小幅度、连续性改进；突破性技术创新是对现有技术或工艺进行重构，以促进新行业、新产品或新市场产生，并在一段时间内引起产业结构的变化^[1]。

相较于渐进性技术创新，突破性技术创新具有新颖性^[20]、长期性^[21]特征。基于新颖性特征，有学者提出了网络邻近性指标以识别技术创新类型，如付莉等^[22]在研究高新区区域创新企业合作网络时发现，邻近性对企业的创新能力有着正向影响，并可用于识别渐进性技术创新。该指标能够衡量个体在技术领域的相似程度，若某项专利技术与先前已有专利技术的相似度越低，则说明该专利技术的新颖性越高^[23]。基于长期性特征，有学者提出了突破性技术创新的周期较长，需要经过长期的培育^[24]。

鉴于此，本文基于新颖性和长期性两个特征，采用技术邻近度指标衡量技术的创新突破程度，并引入创新周期指标评估技术发展周期的长短，进而实现技术创新类型的识别。

2 研究框架

基于对相关文献的梳理，本文提出了基于 SAO 的全景技术演化路径识别及其创新类型分析框架，主要包括专利数据获取、全景技术演化路径识别及技术演化路径创新类型分析 3 个步骤，如图 1 所示。

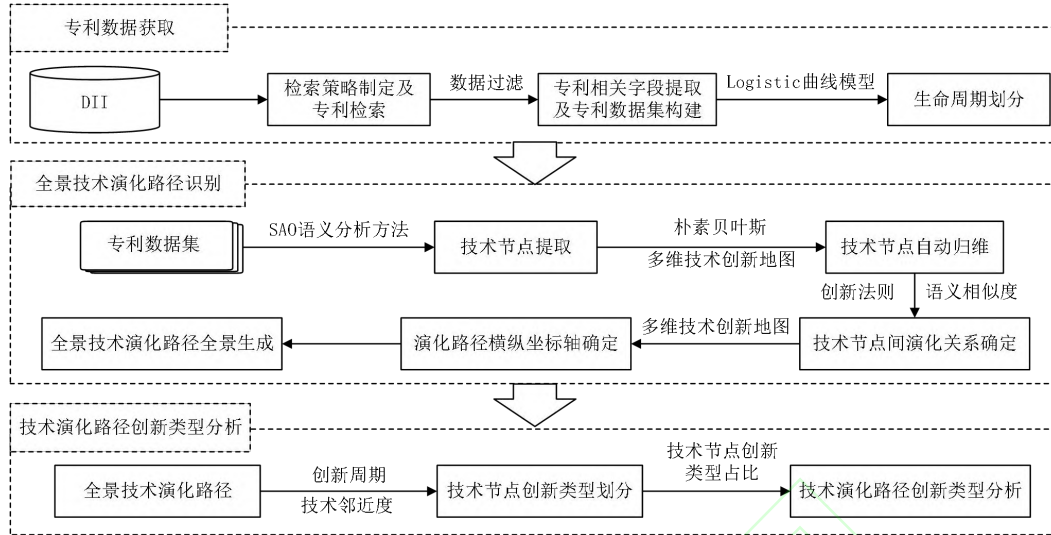


图 1 基于 SAO 的全景技术演化路径识别及其创新类型分析框架

Fig.1 SAO-based Panoramic Technology Evolution Path Identification and Its Innovation Type Analysis Framework

2.1 专利数据获取

本文以 Derwent Innovation Index (DII) 专利数据库为数据源，获取与目标技术领域相关的数据。首先，通过确定目标技术领域并了解该领域的关键概念、关键词及相关子领域，制定检索策略并进行专利检索；其次，为提升数据的准确性及相关性，本文构建了基于专家知识的目标领域技术术语语体库^[25]，该语体库包含了目标领域内的常用技术术语及行业标准等信息，并据此移除少量与目标领域相关性较弱的数据；第三，提取专利标题、摘要、发表时间和权利要求书等字段，并将同一年的专利标题、摘要及权利要求书作为一个独立的专利数据集；最后，由于技术生命周期能有效描述技术的发展轨迹^[26]，本文运用 Logistic 曲线模型演绎了技术发展过程以判断目标技术发展阶段，为后续技术演化路径创新类型分析提供了依据，具体表达公式如公式（1）所示：

$$y = \frac{L}{1 + \alpha \cdot \exp^{-\beta}} \quad (1)$$

其中， y 代表技术累计特性，通常为技术专利申请或授权的年累计数； α 代表技术成长曲线斜率； β 为 S 曲线的反曲点（Inflection Point），代表成长曲线的转折点，也是技术成长速度最快的点； L 代表技术成长的饱和值（Saturation），即技术累计特性的极限值。技术生命周期划分标准为：小于 $L*10\%$ 的阶段为技术生命周期的萌芽期， $[L*10\%, L*90\%]$ 为技术成长期，大于 $L*90\%$ 的阶段为技术生命周期的成熟期与衰退期。

2.2 全景技术演化路径识别

2.2.1 基于 SAO 语义分析的技术节点提取

在提取 SAO 结构之前需要对专利数据进行预处理，包括专利文本分句、词性还原、去除停用词、词性标注等^[27]。

基于预处理后的专利数据，可提取其中的 SAO 结构作为技术演化路径的技术节点。本文使用 Python 软件中的 spaCy 库进行 SAO 结构的提取。

在初步提取出 SAO 结构之后，还需结合已构建的技术术语语体库对其进行数据清洗。具体操作过程如下：由课题组成员对比 SAO 结构中的 S、O 结构与技术术语语体库中的相关技术术语，筛选出与技术术语相同或相似的 SAO 结构。对于未被筛选的 SAO 结构，由相关领域专家再次确认其是否与技术主题密切相关，能否作为技术形态的载体。经由上述步骤筛选得到的 SAO 结构更为准确。

2.2.2 基于朴素贝叶斯的技术节点自动归维

针对前述获取的技术节点，本文基于多维技术创新地图中创新维度的含义，采用朴素贝叶斯分类器对其进行维度划分。具体操作过程如图 2 所示，主要包括：分类样本预处理、分类器训练及分类器应用 3 个步骤。

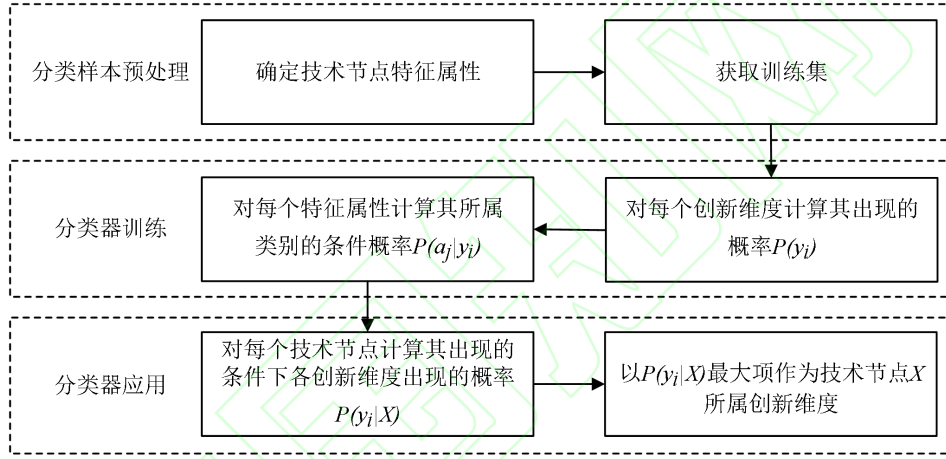


图 2 技术节点自动归维流程

Fig.2 Flow of Automatic Dimensionalization of Technical Nodes

由图 2 可知：

步骤一：分类样本预处理。该阶段将 SAO 结构的 Subject、Action、Object 定义为每个技术节点的 3 个特征属性，按照 3 : 1 : 1 比例将技术节点随机划分为训练集、验证集和测试集^[28]，并由课题组成员结合创新维度的含义对训练集中技术节点所属的创新维度进行研判并标注，为后续分类器训练提供参考标准。

步骤二：分类器训练。该阶段以训练集为输入，运用朴素贝叶斯分类算法训练分类器，计算各创新维度在训练集中的出现概率 $P(y_i)$ 及各特征属性在不同创新维度中出现的概率 $P(a_j|y_i)$ ，并使用验证集验证分类器的分类效果， $P(y_i)$ 和 $P(a_j|y_i)$ 的计算如公式（2）所示：

$$P(y_i) = \frac{N_{y_i}}{N} \quad (2)$$

其中， N 代表训练集中技术节点总数， N_{y_i} 代表属于 y_i 创新维度的技术节点个数。

$$P(a_j|y_i) = \frac{|在训练样本属于y_i时, a_j出现的次数|}{|y_i训练样本数|} \quad (3)$$

其中, a_j 代表某一技术节点所对应的特征属性, y_i 代表某一创新维度。

步骤三: 分类器应用。该阶段以训练好的分类器与测试集为输入, 根据贝叶斯公式计算测试集中每个技术节点出现的条件下各个创新维度 y_i 出现的概率 $P(y_i|X)$, 并将概率最大者判定为该技术节点所属的创新维度, 具体贝叶斯公式如公式(4)所示:

$$P(y_k|X) = \frac{P(X|y_i)P(y_i)}{P(X)} \quad (4)$$

其中, X 代表某一技术节点。

当 $P(y_k|X) = \max\{P(y_1|X), P(y_2|X), P(y_3|X), \dots, P(y_n|X)\}$ 时, 认为该技术节点属于 y_k 创新维度。

2.2.3 基于多维创新地图的全景技术演化路径生成

根据技术节点的创新维度划分结果, 以创新维度为纵轴、技术节点所属专利的发表年份为横轴, 并使用不同符号表示不同维度的技术节点, 进而构建全景技术演化路径。进一步, 本文基于技术节点间的语义相似度及其所涉及的创新法则, 对技术节点间的演化关系进行了判定。

首先, 利用 BERT 模型对每个创新维度中技术节点之间的语义相似度进行计算。将技术节点的 Subject、Action、Object 分别输入 BERT 模型进行编码, 转化为向量形式; 而后, 根据余弦相似度公式计算同一创新维度中技术节点之间的语义相似度, 如公式(5)所示:

$$Sim(SAO_i, SAO_j) = \cos \theta = \frac{m \cdot n}{\|m\| \times \|n\|} \quad (5)$$

其中, m 、 n 表示两个 SAO 结构的向量; $\|m\|$ 、 $\|n\|$ 分别表示向量 m 和向量 n 的模。在 SAO 结构余弦相似度计算结果基础上, 需要对其进行归一化并构建相似度矩阵。

其次, 基于相似度判定技术节点之间是否存在演化关系。具体而言, 从技术节点 SAO_1 开始, 针对每个技术节点, 找寻同一创新维度中与其相似度最高的技术节点, 并将这两个技术节点判定为存在演化关系的技术节点对。

最后, 针对存在演化关系的技术节点对, 结合多维技术创新地图中创新法则的具体含义, 判断其具体演化关系, 并用不同颜色箭头进行标注, 从而细粒度生成全景技术演化路径。

2.3 技术演化路径创新类型分析

在生成全景技术演化路径的基础上, 还需计算路径中技术节点所属专利的技术邻近度和创新周期, 以研判路径中技术节点的创新类型, 并据此进一步识别各技术演化路径所归属的创新类型。

首先, 计算技术演化路径中各技术节点所属专利的技术邻近度和创新周期, 如公式(6)所示:

$$\cos \theta = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}} \quad (6)$$

其中， A_i 、 B_i 分别表示两个专利的文本特征向量，如公式（7）所示。

$$T = T_i - T_j + 1 \quad (7)$$

其中， T_i 、 T_j 分别表示两个专利的发表时间。

其次，以两个指标均值为阈值^[1]，若技术节点的创新周期小于阈值且技术邻近度大于阈值，则认为该技术节点属于渐进性技术创新；若技术节点的创新周期大于阈值且技术邻近度小于阈值，则认为该技术节点属于突破性技术创新。具体技术节点创新类型划分标准如图3所示。

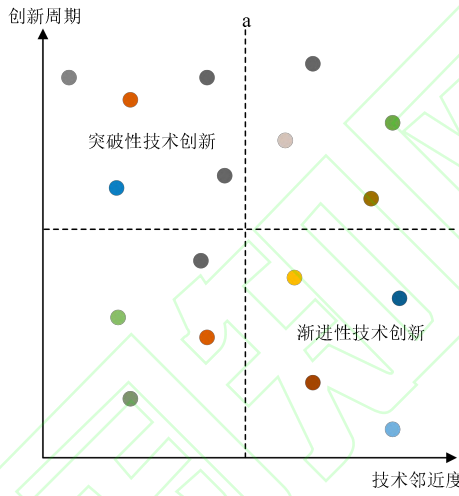


图3 技术节点创新类型划分

Fig.3 Classification of Innovation Types in Technology Nodes

图3中，横、纵坐标轴分别表示技术邻近度和创新周期，a、b两条虚线分别表示技术邻近度和创新周期的均值，不同颜色的点则代表不同的技术节点所属专利。位于a左侧及b上方的技术节点，属于经过长时间的研究与积累形成的显著区别于以往技术的突破性技术创新，可为整个行业提供前所未有的创新视角和切实可行的解决方案；位于a左侧及b下方的技术节点，属于通过较短时间研发便与现有技术产生了显著差异的技术变革，对行业进步和发展同样起到了不可忽视的推动作用；位于a右侧及b下方的技术节点，属于对现有技术进行小幅度、持续改进的渐进性技术创新；位于a右侧及b上方的技术节点，属于经历了较长时间探索，但因技术瓶颈或市场需求限制未能实现较大突破的技术创新。其中，渐进性技术创新和突破性技术创新在技术发展的不同阶段与层面相互补充、相互促进，共同推动科技进步和产业发展。因此，本文重点关注并识别这两种技术创新类型。

最后，在判别技术节点创新类型基础上，计算每条技术演化路径中分别属于两种创新类型的技术节点数，并将占比较大的技术创新类型作为该路径的创新类型。

3 应用研究——以石墨负极材料制备技术为例

石墨材料因其来源广、成本低、充放电平台安全稳定等特征^[29]，在锂离子电池领域得到了广泛应用。因此，本文选取石墨负极材料制备技术的相关专利作为实证数据，采用上述方法识别了石墨负极材料制备技术的全景技术演化路径并分析了其创新类型。

3.1 石墨负极材料制备技术专利数据获取

首先，在 DII 专利数据库中以 TS=（（preparation of）AND（（graphite anode material）OR（graphite negative electrode material）））为检索式进行检索，时间范围设定在专利公开日起 2003 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日，本文获得了石墨负极材料制备技术相关专利 2 841 项。其中，专利申请人主要来自中国，专利类型大多数为发明专利，具体数据特征分布如图 4 所示。

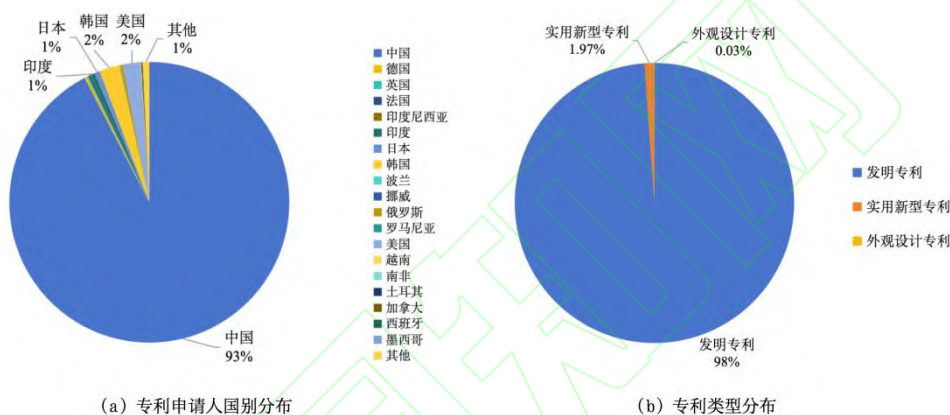


图 4 专利数据特征分布

Fig.4 Patent Data Characteristics Distribution

其次，借助石墨负极材料领域内专家的专业理论知识、实践经验以及标准化知识，本文建立了石墨负极材料制备技术领域的技术术语语体库，并据此剔除关联度及技术含量较低的专利，最终获得了 1 264 项专利。

第三，提取专利中的标题、摘要、专利号、发表时间、权利要求书等文本信息，并将每年的石墨负极材料制备技术专利标题、摘要及权利要求书文本作为一个独立的专利数据集，为后续的技术节点提取提供数据输入。

最后，本文根据每年的石墨负极材料制备技术专利数量，使用 Loglet Lab 软件中的 Logistic 模型拟合了石墨负极材料制备技术的生命周期曲线，如图 5 所示。

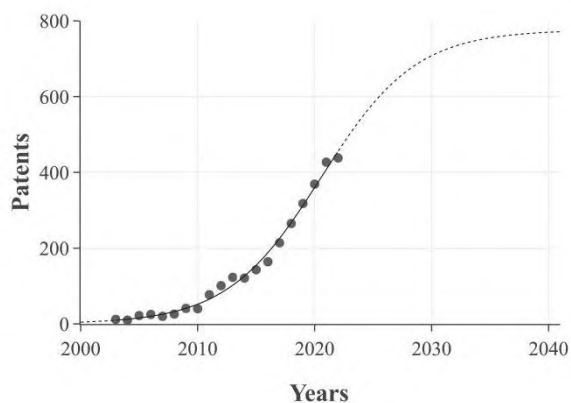


图 5 石墨负极材料制备技术生命周期曲线

Fig.5 Life Cycle Curve of Graphite Anode Material Preparation Technology

根据 Loglet Lab 软件拟合的结果，可以将石墨负极材料制备技术的发展划分为萌芽期、成长期和成熟期 3 个阶段，如表 3 所示。

表 3 石墨负极材料制备技术生命周期阶段划分

Tab.3 Graphite Anode Material Preparation Technology Life Cycle Stage Division

发展阶段	萌芽期	成长期	成熟期	目前阶段
年份	2003 年—2011 年	2012 年—2030 年	2031 年—2039 年	成长期

第一阶段为 2003 年—2011 年，该阶段相关专利申请量增长缓慢，表明石墨负极材料制备技术正处于萌芽期。

第二阶段为 2012 年—2030 年，该阶段相关专利申请量增幅加大，曲线出现明显转折，表明石墨负极材料制备技术进入成长期。

第三阶段为 2031 年—2039 年，该阶段曲线斜率急剧增加，表明石墨负极材料制备技术进入了成熟期。

从总体趋势来看，石墨负极材料制备技术在未来 3 年仍将处于技术成长期，相关专利数量将继续迅速增长。

3.2 石墨负极材料制备技术的全景技术演化路径识别

3.2.1 技术节点的提取

在对前述获得的 1 264 项专利数据进行专利文本分句、词性还原、去除停用词、词性标注等预处理后，使用 Python 软件的 spaCy 库，从上述专利的标题、摘要及权利要求书等字段提取出原始 SAO 结构 624 条。

在此基础上，利用本文构建的石墨负极材料制备技术术语语体库对 SAO 结构进行数据清洗，筛选出与语体库相匹配或相似的 SAO 结构。而对于不相似的 SAO 结构，本文邀请石墨负极材料领域的两位专家，根据其从业经验对这部分 SAO 结构的相关性进行研判，最终共获得 234 条 SAO 结构以作为后续构建全景技术演化路径的技术节点，部分结果如表 4 所示。

表 4 石墨负极材料制备技术的 SAO 结构（部分）

Tab.4 SAO Structure of Graphite Anode Material Preparation Technology (Partial)

编号	年份	S	A	O
CN115395003-A	2022	graphitizable carbon material	coats	graphite
CN113104845-A	2021	raw material	uses	electrode joint powder
KR2153309-B1	2020	second coating layer	utilizes	amorphous carbon
CN109244392-A	2019	coating process	adopts	atomic layer deposition method
KR2018055263-A	2018	resultant mixture	heat at	2500-3500 degrees C
CN106505198-A	2017	fused component	undergo	carbonization
CN105322170-A	2016	mixture	undergoes	heating and cooling
KR2015074295-A	2015	preparation method	involves	heat-treating process
CN104037417-A	2014	carbonization treatment	precedes	graphitization treatment
CN103086363-A	2013	raw material	reacts with	asphalt by dip coating process
CN102347481-A	2012	graphite particles	undergoes	spheroidization
CN102030326-A	2011	resin carbon	coats	asphalt carbon
WO2006125358-A1	2005	organic pyrolytic carbon	covers	spherical graphite surface
CN1417876-A	2003	converted graphite	stoves at	certain temperature

3.2.2 技术节点的自动归维

利用朴素贝叶斯分类器可将所获取的技术节点划分到对应的创新维度中。通过调研发现，石墨负极材料制备技术包括原料制备、石墨化处理和成型工艺 3 个环节，故本文将上述技术节点划分到材料维、机理维、环境维、结构维和时序维 5 个创新维度。

首先，以 SAO 结构的 Subject、Action、Object 为技术节点的特征属性，以结构维、机理维、环境维、材料维和时序维为技术节点的类别标签，并分别用序号 1、2、3、4、5 进行标注，按照 3:1:1 的比例，将技术节点随机划分为训练集、验证集和测试集^[38]，具体划分结果如表 5 所示。

表 5 数据集划分结果

Tab.5 Results of Dataset Segmentation

数据集类别	训练集	验证集	测试集	总计
数量	140	47	47	234

对于训练集的样本数据，由课题组成员结合创新维度的含义对各样本的类别标签进行标注，部分样本类别标签标注结果如表 6 所示。

表 6 训练集样本类别标签标注结果（部分）

Tab.6 Sample Category Labeling Results for the Training Set (Partial)

SAO	特征属性			类别
	Subject	Action	Object	标签
SAO ₁	metal oxide	cover	surface of graphite	1
SAO ₂	converted graphite	stove at	certain temperature	3
SAO ₃	coating process	adopt	solution method	2

SAO ₄	raw material	utilize	natural graphite	4
SAO ₅	first coating layer	be	monomer of polymer	4
SAO ₆	first coating process	adopt	dipping method	2
SAO ₇	second coating layer	be	high-molecular solid electrolyte	4
SAO ₈	second coating process	adopt	radiation method	2
SAO ₉	carbon	coat	surface of the graphite powder	1
SAO ₁₀	coating process	adopt	spray granulating method	2
SAO ₁₁	raw materials	comprise	modified natural graphite and artificial graphite	4
SAO ₁₂	organism	cover	natural graphite surface	1
SAO ₁₃	converted material	undergo	thermal process	2
SAO ₁₄	raw material	utilize	natural crystalline flake graphite	4
SAO ₁₅	raw material	undergo	conglomeration treatment	2
SAO ₁₆	organic pyrolytic carbon	cover	spherical graphite surface	1
SAO ₁₇	layers of graphite crystal	contain	inserted transition metal elements	1

其次，以训练集为输入数据，运用 Python 软件 scikit-learn 库的朴素贝叶斯分类算法训练分类器，基于式（2）和式（3）计算结构维、机理维、环境维、材料维和时序维 5 个创新维度在样本中出现的概率，以及各特征属性在不同创新维度中出现的概率。经验证集检验，朴素贝叶斯分类器模型最终的标注准确率达到 86%。

为了检测模型的综合性能优劣，本文对同一样本数据分别使用随机森林与决策树进行分类，并采用准确率、精度、召回率、F1 值 4 项指标评估模型的分类效果，具体如表 7 所示。

表 7 三种分类器分类效果对比

Tab.7 Comparison of Classification Effects of Three Classifiers

分类器	准确率	精度	召回率	F1 值
朴素贝叶斯 (本文)	0.86	0.94	0.86	0.92
随机森林	0.86	0.91	0.86	0.86
决策树	0.79	0.89	0.79	0.80

由表 7 可知，朴素贝叶斯分类器的精度和 F1 值最高，表明其预测结果的可靠性较高，且综合分类性能更优；随机森林分类器在准确率和召回率上与朴素贝叶斯相当，但在精度和 F1 值上略逊一筹；决策树分类器的各项指标均略低于其他两种分类器，尤其是在召回率和 F1 值上的差距较大，表明其预测结果的可靠性较低。综合考虑以上指标发现，朴素贝叶斯分类器的性能最佳。

最后，以测试集为输入数据，利用训练好的朴素贝叶斯分类器，计算每个技术节点出现的条件下各个创新维度出现的概率，并对各技术节点进行维度划分，部分结果如表 8 所示。

表 8 SAO 结构维度划分结果（部分）
Tab.8 Results of SAO Structure Dimensioning (Partial)

维度	SAO 结构	时间（年）
结构维	metal oxide/covers/surface of graphite	2003
	carbon /coats/surface of the graphite powder	2003
	layers of graphite crystal/contain/inserted transition metal elements	2005
	particle D50 after grinding/is/5 μ m	2016
	asphalt/coats/surface of graphite	2017
材料维	raw material/utilizes/natural graphite	2003
	raw materials/comprise/modified natural graphite and artificial graphite	2005
	graphite/mix with/asphalt mixture	2015
	core material/uses/spherical micro crystalline graphite	2018
	heated high molecular material and water/use as/adhesive	2020
机理维	coating process /adopts/ solution method	2003
	converted material/undergoes/thermal process	2005
	raw material /reacts with/asphalt by dip coating process	2013
	preparation method/involves/heat-treating process	2015
	preparation of coated material/uses/liquid phase impregnation	2018
环境维	converted graphite/stoves at/certain temperature	2003
	rapid expansion heat treatment/perform at/800 ~ 1000° C	2015
	composite material/carbonizes at/600 ~ 1500° C	2015
	mixture/heat at/300 ~ 500 degrees C for 4 to 6 hours	2016
	resultant mixture /heat at/2500 ~ 3500 degrees C	2018
时序维	carbonization treatment/precedes/graphitization treatment	2014

3.2.3 全景技术演化路径的生成

在基于朴素贝叶斯实现技术节点的自动归维基础上，通过测度各个创新维度中技术节点之间的语义相似度大小，可判定其是否存在演化关系。在此过程中，本文使用 BERT 模型并基于式（5）计算技术节点之间的语义相似度，并根据计算结果判定技术节点之间是否存在演化关系，由此获得存在演化关系的技术节点对。其中，结构维的 SAO 语义相似度计算结果如表 9 所示。

表 9 结构维 SAO 语义相似度计算示例

Tab.9 Example of SAO Semantic Similarity Calculation for Structural Dimensions

编号	SAO ₁	SAO ₉	SAO ₁₂	SAO ₁₆	SAO ₁₇	SAO ₂₈	SAO ₃₀
SAO ₁	1						
SAO ₉	0.893	1					
SAO ₁₂	0.828	0.830	1				
SAO ₁₆	0.897	0.898	0.852	1			

SAO ₁₇	0.833	0.883	0.841	0.855	1		
SAO ₂₈	0.855	0.858	0.766	0.886	0.801	1	
SAO ₃₀	0.830	0.893	0.848	0.866	0.871	0.888	1

进一步地，本文邀请石墨负极材料领域具有 5 年以上实践经验的 10 名专家组成决策小组，结合多维技术创新地图中创新法则的含义，针对存在演化关系的技术节点对，研判了石墨负极材料制备技术节点之间的演化关系。以结构维为例，具体操作如下。

鉴于 SAO₁（metal oxide covers graphite）中使用金属氧化物来包覆石墨材料，而 SAO₁₂（organism covers natural graphite）中使用有机物以替代金属氧化物进行包覆，结合替代法则的含义可知，技术节点对 SAO₁→SAO₁₂ 的具体演化关系为替代法则。以此类推，可完成对结构维以及其他各维度的技术节点对演化关系的研判，具体如表 10 所示，根据研判结果技术节点对演化关系主要包括替代、组合与集成、分解与去除、局部优化 4 种创新法则。

表 10 结构维技术节点对演化关系判定结果

Tab.10 Determination Results of Evolutionary Relationship of Technology Nodes in Structural Dimension

技术节点对	演化关系	技术节点对	演化关系
SAO ₁ →SAO ₁₂	替代	SAO ₁₁₁ →SAO ₁₁₆	分解与去除
SAO ₉ →SAO ₁₆	替代	SAO ₁₁₆ →SAO ₁₄₃	替代
SAO ₁₂ →SAO ₁₄₃	局部优化	SAO ₁₂₈ →SAO ₁₈₈	替代
SAO ₁₆ →SAO ₅₄	局部优化	SAO ₁₄₃ →SAO ₁₇₄	替代
SAO ₂₈ →SAO ₆₅	替代	SAO ₁₄₈ →SAO ₁₅₈	替代
SAO ₃₀ →SAO ₄₇	局部优化	SAO ₁₅₈ →SAO ₁₈₄	替代
SAO ₃₂ →SAO ₃₅	局部优化	SAO ₁₇₄ →SAO ₂₀₈	替代
SAO ₄₇ →SAO ₄₈	分解与去除	SAO ₁₈₄ →SAO ₂₃₀	替代
SAO ₅₄ →SAO ₆₅	局部优化	SAO ₁₈₈ →SAO ₁₈₉	替代
SAO ₆₅ →SAO ₁₈₄	替代	SAO ₁₈₉ →SAO ₂₀₁	替代
SAO ₈₉ →SAO ₁₁₁	替代	SAO ₂₀₈ →SAO ₂₂₇	替代
SAO ₉₃ →SAO ₉₄	分解与去除	SAO ₂₂₇ →SAO ₂₃₃	替代
SAO ₁₀₆ →SAO ₂₀₁	局部优化		

基于各维度技术节点对演化关系的判定结果，可绘制出石墨负极材料制备技术的全景技术演化路径图，如图 6 所示。其中，不同维度的技术节点以不同形状表示，表征技术节点间演化关系的不同创新法则以不同颜色的箭头表示。

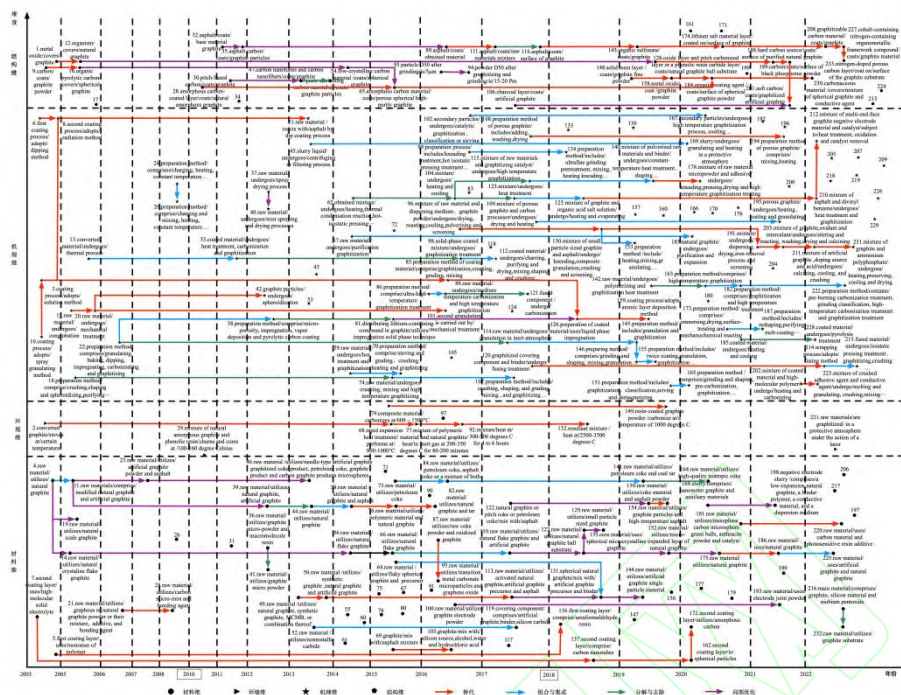


图 6 石墨负极材料制备技术的全景技术演化路径

Fig.6 Panoramic Technology Evolution Path of Graphite Anode Material Preparation Technology

图 6 中，基于 SAO 的全景技术演化路径直观展示了石墨负极材料制备技术在不同维度上的具体演变轨迹。具体而言：

从结构维来看，可识别出包括包覆结构、原材料结构等在内的多条并行且交错的演化轨迹。其中，包覆结构的演化路径较长，演化脉络清晰，技术节点数量占比较大。在技术萌芽期，石墨表面通过使用金属或金属氧化物（2003 年）、有机物（2005 年）、沥青（2011 年）等进行包覆；在技术成长期，复合碳材料（2013 年）、碳纳米管（2022 年）等高性能包覆层成为主流，增强了石墨负极材料的性能和稳定性。相比之下，原材料结构的演化路径较短，主要集中于材料粒度的改变（2016 年）。总体来看，结构维主要涉及替代、局部优化及分解与去除等法则。

从机理维来看，制备技术呈现出多元化演化脉络，包括包覆技术、多孔石墨制备技术、原材料加工等技术。这些技术早期使用的溶液法、浸渍法、辐射法、热处理（2003 年）等方法，均存在操作复杂、效率低下等问题。因此，技术成长期主要集中于技术的优化与改进，如浸渍过程中的添加剂被替换为沥青（2013 年），液相浸渍法（2018 年）和原子层沉积法（2019 年）等新技术的发展。这些技术既提高了负极材料的稳定性，又减少了其与电解质之间的副反应，进而延长了电池的循环寿命。总体来看，机理维主要涉及替代、局部优化等法则。

从环境维来看，技术演化路径略显稀疏，尤其是路径的末端节点较为分散，表明近年来新兴技术的不断涌现。在技术萌芽期，热处理技术主要使用高温炉（2003 年），其温度和加热时间依赖于经验，控制不够精确。因此，在技术成长期，高温炉被更为先进的控制

气氛烧结（2015 年）所替代，同时还发展了新型的微波加热技术（2018 年），该技术能更好地控制热效应和化学反应，提高制备效率与产品质量稳定性。此外，离子体增强碳化（2015 年）和微波碳化（2019 年）等新型碳化技术在这个时期也开始受到关注。总体来看，环境维主要涉及替代法则。

从材料维来看，整体技术演化脉络多样，相关制备技术较为成熟，表明近年来相关创新主要集中在原材料的改进上。技术萌芽期的主要原料为天然石墨（2003 年），但由于其品质不稳定，研究者在技术成长期将复合石墨（2012 年）和人造石墨（2017 年）等性能更为稳定的材料用于原料的制备。与此同时，研究者也开始在原材料中添加如氮元素（2019 年）、合金元素（2021 年）和硅元素（2022 年）等辅助材料，以改善原材料的电化学性能。总体来看，材料维主要涉及替代、局部优化、组合与集成以及分解与去除法则。

3.3 石墨负极材料制备技术演化路径创新类型分析

为探究石墨负极材料制备技术演化路径的创新类型，本文通过计算各创新维度中技术节点所属专利的技术邻近度与创新周期，研判了各技术节点的创新类型，进而对其所构成的技术演化路径的创新类型进行分析。

需要说明的是，由于环境维中技术节点较少且分布相对分散，本文未对环境维技术演化路径的创新类型进行分析。

基于式（6）和式（7），计算各维度技术节点所属专利的技术邻近度与创新周期，并以二维图的形式分别展示各维度技术节点的分布，如图 7 所示。

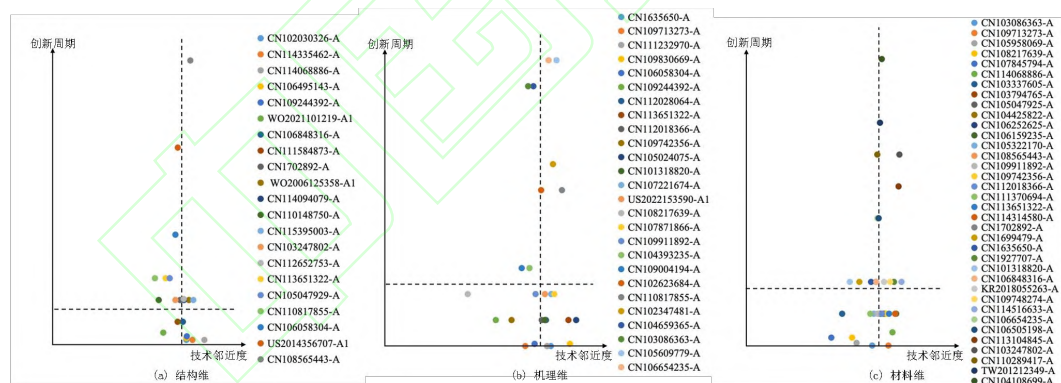


图 7 石墨负极材料制备技术各维度的技术节点分布

Fig.7 Distribution of Technology Nodes in Each Dimension of Graphite Anode Material Preparation Technology

由图 7 可判断出各维度技术节点的创新类型，进而明确各演化路径的创新类型。

在结构维技术演化路径上的 21 项专利中，有 6 项属于渐进性技术创新（CN102030326-A、CN114335462-A、CN114068886-A、CN106495143-A、CN109244392-A、CN106848316-A），主要分布于技术萌芽期和成长期的中后期，这类专利多使用替代法则，如包覆结构从金属或金属氧化物包覆（2003 年）逐步替换为碳包覆（2003 年）、有机物包覆（2005 年）等，以提高石墨负极材料的导电性和稳定性，进而提升能源存储设备

的性能；属于突破性技术创新的 8 项专利（CN1702892-A、CN110148750-A、CN103247802-A、CN113651322-A、CN105047929-A、CN110817855-A、CN106058304-A、US2014356707-A1），主要分布于技术生命周期各个阶段的初期，这类专利多使用局部优化法则，如针对石墨包覆所使用的碳材料进行优化，形成复合碳材料（2013 年）、碳纳米管（2022 年）等高性能包覆层。总体上，该路径以突破性技术创新为主，遵循从简单到复杂的演变规律。

在机理维技术演化路径上的 26 项专利中，有 11 项属于渐进性技术创新（CN1635650-A、CN111232970-A、CN109830669-A、CN112028064-A、CN113651322-A、CN112018366-A、CN105024075-A、CN101318820-A、CN107221674-A、US2022153590-A1、CN107871866-A），主要分布于技术生命周期各个阶段的中后期，这类专利多使用组合与集成法则，如原材料处理技术在技术萌芽期多采用球形化处理或机械处理（2005 年）等简单的加工方式，到技术成长期则开始采用热缩反应与热等静压处理（2014 年）等物理与化学加工相结合的方法，显著提高了首次充放电效率及循环性能；属于突破性技术创新的 4 项专利（CN104393235-A、CN109004194-A、CN104659365-A、CN103086363-A），主要分布于技术发展过渡期，这类专利多使用替代法则，如技术成长期，研究者更关注环保与可持续性发展，将粘接剂替换为不含苯环且能溶于水的高分子材料，并将微粉压型成块体（2020 年），以改善生产环境。总体上，该路径以渐进性技术创新为主，遵循从复杂到简单、从环境破坏型生产到环境友好型生产的演变规律。

在材料维技术演化路径上的 36 项专利中，有 12 项属于渐进性技术创新（CN109713273-A、CN114068886-A、CN103794765-A、CN105047925-A、CN104425822-A、CN106252625-A、CN106159235-A、CN108565443-A、CN109742356-A、CN112018366-A、CN113651322-A、CN114314580-A），分布于成长期，这类专利多使用替代法则，对原有技术改进幅度较小，如技术萌芽期所使用的原料多为天然石墨（2003 年），但其不稳定的品质会影响产品性能，因此在技术成长期将原料替换为复合石墨（2012 年）和人造石墨（2017 年）；属于突破性技术创新的 8 项专利（CN1702892-A、CN1699479-A、CN1635650-A、CN101318820-A、CN106848316-A、CN106654235-A、CN106505198-A、CN110289417-A），分布于技术生命周期各个阶段的初期，这类专利多使用组合与集成法则，如为提升石墨负极材料的性能，研究者在技术成长期开始将改性剂、离子掺杂剂等辅助材料添加于原材料中，包括氮元素（2019 年）、合金元素（2021 年）和硅元素（2022 年）等的掺杂。总体上，该路径以渐进性技术创新为主，遵循单一材料—复合材料—辅助掺杂材料的演变规律。

综上所述，鉴于石墨负极材料制备技术目前正处于技术成长期，伴随着技术的推广，市场版图持续拓展，随之而来的是日益激烈的行业竞争态势。在此背景下，企业应敏锐洞

察技术演进的脉络与规律，灵活运用创新法则，对现有技术进行革新与突破，从而稳固并提升市场地位，确保石墨负极材料制备技术在激烈的市场竞争中的可持续发展。

4 结论与展望

本文提出了一种将 SAO 语义分析方法与多维技术创新地图结合的技术演化路径识别及其创新类型分析的方法。该方法在有效识别 SAO 结构并将其自动归维的基础上，通过构建全景技术演化路径，剖析了技术节点间的演化关系，并基于技术邻近度以及创新周期两项指标的组合，区分了技术演化路径的创新类型。

此外，本文以石墨负极材料制备技术为例，基于 DII 专利数据库中 2003—2022 年的相关专利，从机理维、材料维、结构维、环境维等维度识别了该技术的全景技术演化路径及其创新类型，从而验证了本文所提方法的可行性。

相较于已有研究，本文的主要贡献包括：一是基于朴素贝叶斯实现技术节点的自动归维，提升了技术演化路径构建的效率与精度。二是在计算技术节点间语义相似度的基础上，依托多维技术创新地图中的创新法则确定技术节点之间的具体演化关系，更为深入地揭示了技术节点之间的演化逻辑，进而丰富了技术演化路径的信息层次。三是在生成技术演化路径的基础上，引入技术邻近度与创新周期两个指标，分析了技术演化路径的创新类型，为技术演化路径分析提供了新视角，也为企业在不同维度上制定针对性的技术创新策略提供了可资借鉴的参考。

本文所提的方法也存在一定的局限性。因本文所获取的专利数据的数量较少，且大部分集中于同一国家，故在数据收集时未考虑专利家族，但当数据量较大且来源国较多时，忽视此因素可能影响数据的全面性和准确性，后续收集数据时可将专利家族纳入考量范畴。此外，本文在创新法则判定与标记的过程中主要依赖于人工操作，后续研究可尝试借助 USIT 方法或构建创新法则相应的 action 语义词典，开展创新法则的自动判定与标记，以提高技术演化路径的识别效率。

参 考 文 献

- [1] 颜端武, 白敬毅, 李晨晨, 等. 科技领域技术演进的多路径识别及创新特性分析[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(11): 99-107.
- [2] 唐晓波, 吴佳琳, 吴海婷. 基于专利文本多粒度深层语义的技术演化路径智能识别方法研究[J]. 情报理论与实践, 2024, 47(1): 136-144.
- [3] 高楠, 高嘉骐, 陈洪璞. 新兴技术识别与演化路径分析方法研究——以集成电路领域为例[J]. 情报科学, 2023, 41(3): 127-135, 172.
- [4] Gao L D, Porter A L, Wang J, et al. Technology Life Cycle Analysis Method Based on Patent Documents[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2013, 80(3): 398-407.
- [5] Liu H L, Chen Z W, Tang J, et al. Mapping the Technology Evolution Path: A Novel Model for Dynamic Topic Detection and Tracking[J]. Scientometrics, 2020, 125(3): 2043-2090.
- [6] Kim J, Shin J. Mapping Extended Technological Trajectories: Integration of Main Path, Derivative Paths, and Technology Junctions[J]. Scientometrics, 2018, 116(3): 1439-1459.

- [7] Zhang Y, Zhang G Q, Chen H S, et al. Topic Analysis and Forecasting for Science, Technology and Innovation: Methodology with a Case Study Focusing on Big Data Research[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2016, 105: 179-191.
- [8] Xu H Y, Winnink J, Yue Z H, et al. Topic-Linked Innovation Paths in Science and Technology[J]. Journal of Informetrics, 2020, 14(2): 101014.
- [9] 郭俊芳, 汪雪锋, 李乾瑞, 等. 一种新型的技术形态识别方法——基于 SAO 语义挖掘方法[J]. 科学学研究, 2016, 34(1): 13-21.
- [10] Li X, Wu Y D, Cheng H L, et al. Identifying Technology Opportunity Using SAO Semantic Mining and Outlier Detection Method: A Case of Triboelectric Nanogenerator Technology[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 189: 122353.
- [11] Miao H, Wang Y, Li X, et al. Integrating Technology-Relationship-Technology Semantic Analysis and Technology Roadmapping Method: A Case of Elderly Smart Wear Technology[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2020, 69(1): 262-278.
- [12] Wang X F, Ren H C, Chen Y, et al. Measuring Patent Similarity with SAO Semantic Analysis[J]. Scientometrics, 2019, 121(1): 1-23.
- [13] 冯立杰. 元易创新方法——技术创新的九维九法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2020.
- [14] 冯立杰, 尤鸿宇, 王金凤. 专利技术创新路径识别及其新颖性评价研究[J]. 情报学报, 2021, 40(5): 513-522.
- [15] 冯立杰, 曾小红, 王金凤, 等. 一种三级技术机会识别方法及其应用——基于 SAO 语义分析和多维技术创新地图[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(19): 1-10.
- [16] 冯立杰, 周炜, 王金凤, 等. 基于 SAO 语义分析的多维技术演化路径与技术创新机会识别研究[J]. 情报学报, 2022, 41(11): 1149-1160.
- [17] 王金凤, 仵轩, 张定堂, 等. 失效专利视域语义分析与多维技术创新地图融合的技术机会识别[J]. 数据分析与知识发现, 2023, 7(11): 88-100.
- [18] 约瑟夫·熊彼特. 经济发展理论——对于利润、资本、信贷、利息和经济周期的考察[M]. 何畏, 译. 北京: 商务印书馆, 1990.
- [19] Kash D E, Rycroft R W. Patterns of Innovating Complex Technologies: A Framework for Adaptive Network Strategies[J]. Research Policy, 2000, 29(7-8): 819-831.
- [20] 王巍, 李德鸿, 侯天雨, 等. 多重网络视角下突破性技术创新的研究述评与展望[J]. 科学学与科学技术管理, 2022, 43(10): 83-102.
- [21] 许佳琪, 汪雪锋, 雷鸣, 等. 从突破性创新到颠覆性创新: 内涵、特征与演化[J]. 科研管理, 2023, 44(2): 1-13.
- [22] 付莉, 陈东锋, 丁秋楷. 创新网络中产权交互对企业创新能力的影响——基于高新区多维邻近性的视角[J]. 经济体制改革, 2020(4): 135-141.
- [23] 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.
- [24] 陈虹枢, 宋亚慧, 金茜茜, 等. 动态主题网络视角下的突破性创新主题识别: 以区块链领域为例[J]. 图书情报工作, 2022, 66(10): 45-58.
- [25] 李欣, 谢前前, 黄鲁成, 等. 基于 SAO 结构语义挖掘的新兴技术演化轨迹研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2018, 39(1): 17-31.
- [26] 邢晓昭, 任亮, 雷孝平, 等. 基于专利主题演化的颠覆性技术识别研究——以类脑智能领域为例[J]. 情报科学, 2023, 41(3): 81-88.
- [27] 曹国忠, 杨雯丹, 刘新星. 基于主体—行为—客体 (SAO) 三元结构的专利分析方法研究综述[J]. 科技管理

- [28] 吕琦, 上官燕红, 张琳, 等. 基于文本内容自动分类的跨学科测度研究[J]. 数据分析与知识发现, 2023, 7(4): 56-67.
- [29] 吴宝亮, 李子坤, 周豪杰, 等. 石墨负极材料的发展历史与研究进展[J]. 炭素技术, 2022, 41(4): 6-12.

