

科技关联视角下电网领域演化轨迹揭示

刘沁莹¹, 王宏¹, 胡玉峰², 王庆红¹, 韦嵘晖²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663;

2. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 科技变革日新月异,探究科技发展规律和及时发现科技演化方向迫在眉睫。传统的科技演化轨迹揭示方法主要聚焦于论文或专利等单一创新元素,缺乏对它们之间关联的全面研究。选取电网领域为案例,构建论文互引、专利互引以及专利与论文间互引的3种引文网络,通过采用关键路由主路径分析方法分别提取科学研究的演化轨迹、技术发展的演化轨迹以及科技关联演化轨迹。在未来研究中,应结合引用的语义和语境特征以及遍历权重算法,来提高主路径分析的客观性和准确性。对比这3条演化轨迹发现,融合专利与论文互引的引文网络能够产生更为复杂的科学与技术关联的演化模式,同时识别出多个子领域的研究前沿,如电力传输和存储技术子领域、智能系统子领域、多智能体子领域和网络控制系统子领域。

关键词: 主路径分析; 科技关联; 演化轨迹; 电网领域

中图分类号: G250 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0019-09

新一轮科技革命与产业变革正在以前所未有的速度演进,中美贸易摩擦愈演愈烈,双方的博弈开始向科技领域蔓延,科技创新越来越成为综合国力竞争的重要因素,更是赢得未来的关键^[1-4]。在激烈的国际竞争中,准确把握行业领域的主要发展脉络,包括明确鲜明的科技变革主线以及清晰的科技变化趋势,深刻理解研究范式的革新和技术发展的变迁路径,抢占未来科技发展的先机,为国家的科学技术创新战略提供了一个具有科技全局高度的参考坐标。在党的二十大报告中也明确提出,科技是第一生产力,创新是第一动力。掌握科技发展的态势、研判未来科技创新的趋势、把握未来发展的主动权,对于科技决策具有重要意义。

科学和技术是创新的两大关键因素^[5-6]。科学论文承载着科学发现,而专利文献则是技术创新的有效载体。两者的融合与交叉既是科学和技术协同发展的重要方式,也是重大科技创新的关键领域。因此,识别和理解科学和技术之间的关联互动模式对于推动科技创新和揭示科技发展走向具有极其重要的意义。科学和技术的互动关系复杂,可

以被视为一个双向互动模式的双螺旋模式^[7]。然而,现有研究传统的科技演化轨迹揭示方法多聚焦于论文或专利单一的创新元素,即从科学或者技术单一知识体系入手揭示各自的发展轨迹,使得所揭示的轨迹比较片面。

本文以电网领域为实验案例进行深入分析。电网领域的发展演化是一个纵贯几十年的远期问题,然而,对电网领域的发展骨架和整体演化的系统性研究相对缺乏。因此,本文旨在整合论文与专利两个知识体系,揭示电网领域科学和技术的核心发展规律。具体来说,提出一种基于融合论文和专利互引信息的引文网络主路径分析方法,旨在深入了解科学与技术之间的关系,探索二者的互动模式和发展规律,并尝试预测科学与技术未来的发展方向。

1 理论基础与研究综述

作为支撑科技创新活动的两股重要力量,科学和技术在逐渐相互渗透、相互交织,形成DNA(脱氧核糖核酸)双链螺旋上升的发展之势。主路径分析是一种有助于理解科学和技术领域内发展趋势的

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 中国南方电网有限责任公司创新项目(ZBKJXM20220013)

作者简介: 刘沁莹(1996—),女,贵州六盘水人,博士,工程师,研究方向为技术和战略情报分析、电网风险管控、电力系统自动化;王宏(1989—),男,湖北荆州人,硕士,高级工程师,研究方向为技术和战略情报分析、数据挖掘、电力系统自动化;胡玉峰(1975—),男,湖南郴州人,博士,高级工程师,研究方向为科技创新管理、知识产权管理、电力系统自动化;王庆红(1976—),男,贵州铜仁人,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力科技创新、技术竞争情报;韦嵘晖(1969—),男,广西岑溪人,高级工程师,研究方向为技术情报咨询、知识管理、科技查新。

方法。采用主路径分析方法有助于深入研究科学和技术之间的互动关系,帮助推动创新和促进科技发展。因此,本文在探索科技创新活动中的主路径时,重点介绍两个方面的相关研究内容,即科技关联和主路径分析。

1.1 科技关联研究

新一轮科技革命深化发展,科学与技术的协同和融合是技术创新的重要助推力,宏观上论文与专利之间双向互动则是衡量科学与技术知识流动和扩散的重要途径^[8-12]。根据论文与专利的引用维度差异,已有科学和技术的关联互动研究大致可分为3种:专利引用论文、论文引用专利、专利和论文的交叉引用。最早由Narin和Noma^[13]利用科学计量学方法从专利文献引用论文,即非专利引文(non-patent reference, NPR)的视角出发,考虑技术创新对基础研究的依赖程度,研究发现科技关联的强弱在不同领域存在差异。这一点也在后续研究中得到证实^[14]。Lo^[15]采用文献计量学方法,发现公共研究机构的基础科学研究对基因工程领域的技术发展具有较大影响,在基因工程专利中,超过90%的引文是非专利文献,同时也进一步证实了先前的发现:科学研究是技术发展背后的驱动力^[16]。Qu等^[17]使用从电动汽车充电技术相关专利文献中提取的非专利参考文献的原始数据集,利用专利范围、专利家族规模、权利要求数量和前向引用4个指标再一次证实了科学论文对后续的技术专利发展的重要性。

利用非专利引文研究“科学-技术”关联关系已经是一种公认科学且可行的方法和手段,单向引用断定两者的关联过于粗略^[18],基于此,学者们开始聚焦于反向引用(论文对专利的引用),考虑基于技术的科学并强调科学与技术之间的相互贡献。Glänzel和Meyer^[9]不同于专利中的科学文献引用,提出了一种利用科学文献中的专利引用信息研究科技关联的新方法,发现化学领域比医学和药学领域更倾向于引用专利;杨祖国等^[19]统计SCI(科学引文索引)来源刊文章引用专利的数据,发现中国专利C部的被引用次数最多,且主要被化学类期刊引用。李睿等^[20]基于科学-技术互馈螺旋理论,利用“反向引用”修正了“科学关联”计量指标。田丽娜和杨祖国^[21]利用社会网络分析方法构建“反向引用”网络,建立了基础学科与技术领域间的联系,发现前1~4年的技术对当前科学影响最大。Zang和Liu^[22]利用非专利引用建立药物-专利-论文引文对

分析引文网络结构、强度、速度及其演变,研究发现科学-技术-创新之间的关联不断增加且更加紧密。尽管关联强度增加,但关联速度趋于减缓。此外,主题的跨领域整合与碎片化促进了科学-技术-创新知识之间更紧密的联系。

单向引用关系难以反映在科学的技术化与技术的科学化进程中两者的渗透和融合,为此学者们探讨了论文-专利交叉引用情况探测科学-技术关联。殷媛媛^[23]以立体显示新兴产业为研究对象,从时间、空间、种类的角度展开科学与技术间的互动研究,发现领域科学与技术的关联度具有国家依存性。Huang等^[24]讨论了燃料电池领域论文和专利的交叉引用情况,发现论文引用专利的时滞比专利引用论文的时滞短3~5年,前者对时间更为敏感,表示论文倾向于引用更新的专利。彭彦淇等^[25]通过分析石墨烯领域的交叉引用发现,专利和论文之间的引用关系呈现出一种不对称性:知识从科学研究向技术创新的传递数量大于从技术创新向科学研究的传递数量。Hammarfelt^[26]使用交叉引用方法,分析了燃料电池领域的论文与专利之间的知识交换,发现科学输出和技术创造之间的引用关系揭示了知识流动的模式和影响。随着引文揭示法下科学与技术关联研究的不断深入,学者们进一步总结出科技互动的几种模式。刘小玲等^[27]将科学-技术的关联关系总结为:科学与技术之间的融合、科学与技术之间的互动协作、科学与技术间的知识传递以及技术对科学的依赖。刘自强等^[28]通过研究基因工程疫苗领域的论文和专利数据,将该领域的科技互动模式分为4种:S模式、T模式、S-T模式以及T-S模式。

1.2 主路径分析研究

主路径分析(main path analysis, MPA)是基于按时间排序的引文网络,识别不同时刻最相关的文献,构成科学研究的发展主干,以揭示领域发展脉络和检测知识传播和扩散轨迹。1989年Hummon和Dereian^[29]首次提出了主路径思想,基于引文的连通性提出了节点对投影数(NPPC)、搜索路径链接数(SPLC)和搜索路径节点对(SPNP)3种遍历算法。依据这3种算法得到的遍历计数结果作为引文网络链接重要性指标,链接遍历计数结果越大,表示此链接参与了较多的知识流动,将最高遍历计数落在同一组连通节点上所构造的主路径,就是引文网络中最重要的知识流动序列。随后, Ba-tagelj^[30]提出了搜索路径计数算法(search path count,

SPC),计算相邻两节点之间的链接被网络中所有的路径所遍历的次数,深化了主路径分析方法。Liu和Lu^[31]根据搜索路径的方式将主路径分为前向/后向局部主路径(local main path)、全局主路径法(global main path)和前向/后向关键路由分析方法(key-route main path)。后续的研究中,许多学者对主路径方法进行了改进和拓展^[32-39]。

在大量的实验研究中,以SPC、搜索路径连接数(search path link count, SPLC)和搜索路径节点对(search path node pair, SPNP)遍历算法最为常用。例如,Verspagen^[40]通过SPC和SPNP遍历算法研究燃料电池领域的技术路径;孙冰等^[41]选择了SPNP算法,通过分析手机芯片技术专利引文网络,成功识别出在扩散过程中起关键作用的核心专利以及主要发展路径;Liu等^[42]认为,在追踪知识扩散轨迹研究中,SPLC是最接近地模拟了科技发展中知识扩散情景的方法。基于此,Xu等^[43]基于SPLC算法利用全局和局部关键路由分析方法对新兴研究主题领域的发展脉络进行了文献综述。此外,Xu等^[44]基于科学-技术-产业关联的视角,将SPLC算法和关键路由主路径分析结合,揭示了药物产业的发展轨迹。显而易见的是,自主路径分析方法提出以来,它在论文引用网络和专利引用网络的研究应用中获得了广泛的关注,成功地辨识出了分别属于科学和技术的路径。然而,从科技互动角度来看,对这两者交叉路径的研究仍相对有限。

2 研究设计

本研究分为3个主要阶段。

(1)数据收集与处理阶段。构建一个包含多种引用关系的综合引文数据集,覆盖论文之间、论文引用专利、专利之间以及专利引用论文的各种互动形式。

(2)引文网络构建阶段。基于这些数据集建立了各类引文网络,其中包括单独的论文与专利引文网络以及综合论文和专利节点的异构引文网络,并对这些网络进行预处理,确保了数据的准确性和适用性。

(3)科技关联演化路径分析阶段。采用SPLC遍历算法并结合关键路由主路径分析方法,专注于探索科学与技术之间的交互和发展过程。为了强调中间节点在知识传递和生成中的作用,在众多遍历权重算法中选择了最适合本研究的SPLC算法。关键路由的选择对于揭示科技间联系至关重要,这些路由一般是遍历权重最高的链路,但会根据研究

的具体问题进行调整。通过精确识别表征学术论文与专利互动的关键路由,构建一个主路径网络,精确映射了科学与技术之间的动态联系,为理解和预测科技发展趋势提供了新的视角。

3 数据来源与处理

3.1 数据收集

首先,从Web of Science数据库中的核心合集数据库(Web of Science Core Collection)检索学术论文并下载,发表时间限定为2015—2022年,共检索到824 470篇学术论文及其DOI(数字对象唯一标识符)、标题、摘要、发表日期和引文信息。由于检索式较长,此处不一一列示。从Derwent数据库(Derwent Innovations Index)检索专利并下载,参考王宏等^[45]制定的检索式:TS = (“CO2 EMISSION” OR “CO2 EMISSIONS” OR “CARBON EMISSION” OR “CARBON EMISSIONS” OR “CARBON DIOXIDE EMISSION” OR “CARBON DIOXIDE EMISSIONS” OR “CARBON NEUTRAL” OR “CARBON NEUTRALITY” OR “CARBON PEAK” OR “CARBON PEAKING” OR “CARBON MITIGATION” OR “CO2 MITIGATION” OR “LOW-CARBON” OR “LOW CARBON” OR “DECARBONIZED POWER SYSTEMS”) OR IP = (“H02B*” OR “H02G*” OR “H02H*” OR “H02J*” OR “H02K*” OR “H02M*” OR “H02N*” OR “H02P*” OR “H02S*”),公开时间限定为2015—2022年,共检索到1 247 235篇专利及其专利号、标题、摘要、公开时间及其参考文献信息。在检索式中,TS代表主题,IP代表IPC专利号,AND代表和的关系,OR代表或的关系,*代表通配符。

从下载的论文和专利集合中提取关键的引文信息,主要专注4种类型的数据:论文间引用、论文引用专利、专利间引用以及专利引用论文。需要说明的是,由于专利引用论文的数据较难直接自动化导出。因此,采取一种匹配方法,参考Marx和Fuegi^[46-47]提出的专利引用论文的引文数据集(PCS)。通过利用这个数据集中已有的引用关系,能够有效地匹配出所收集的专利与论文之间的相互引用关系,从而为分析和理解这些科学与技术之间的互动提供了一个可靠的数据基础。

3.2 引文网络构建

利用收集到的数据集构建一个有向的引文网络。在这个网络中,每个节点表示一篇论文或一

个专利,而节点之间的指向则是根据文献间的知识流动方向确定的,即从被引用的文献(被引文献)指向引用它的文献(施引文献)。构建这个引文网络的过程分为3个主要步骤:①基于论文之间的引用数据构建论文引文网络,该引文网络包含了660 788个节点和3 765 091条链接;②基于专利之间的引用数据构建专利引文网络,该引文网络包含了414 528个节点和577 909条链接;③综合所有的引文数据(包括论文间引用、专利间引用、论文引用专利和专利引用论文)构建更为综合的异构引文网络,这个网络包含了1 085 590个节点和4 337 575条链接。

3.3 数据预处理

在开始领域发展脉络的研究之前,关键步骤是构建一个有向无环的异构引文网络。通过对该异构网络的所有环进行细致分析,发现网络中的环主要分为两种类型:①仅包含论文节点的环;②仅包含专利节点的环。为了处理网络中的大量环,本研究分为两个步骤进行处理。

(1)专注于验证并清理引用关系。根据论文的DOI检索论文原文,从原文中检查了引用关系的正确性,并剔除了错误的论文间引用关系;此外,还根据专利的专利号,检查了专利间的引用关系,并剔除了错误的引用关系。

(2)对于引用关系都正确的环进行深入分析。分析结果显示,同一个环内的论文或专利都存在共同作者,这些论文或专利的研究方向或问题往往高度相关,基于这一发现,把每个环视为一个独立的分析单元。具体而言,在对9 405个仅包含论文节点的环进行网络构建后,从中提取了2 224个子图,每个子图作为网络中的一个节点,代表一个独立且完整的论文集合,并对引文数据进行了更新。此外,采用相似的方法分析并处理了仅包含专利节点的环。在分析涵盖1 171 770个环的专利网络后,提取了11 926个子图,每个子图作为一个节点,代表一个独立且完整的专利集合。图1(a)与图1(b)分别展示了处理仅包含论文节点和专利节点的环的处理过程。需要说明的是,在处理环后,需要提取网络的最大弱连通子图,以便进行后续分析。

4 实验结果

为了充分挖掘科技关联演化轨迹的发展模式,本研究不仅分析了基于论文和专利互引的引文网络,以提取科学研究与技术发展的独立演化轨迹,更进一步整合了融合论文与专利互引的异构网络,

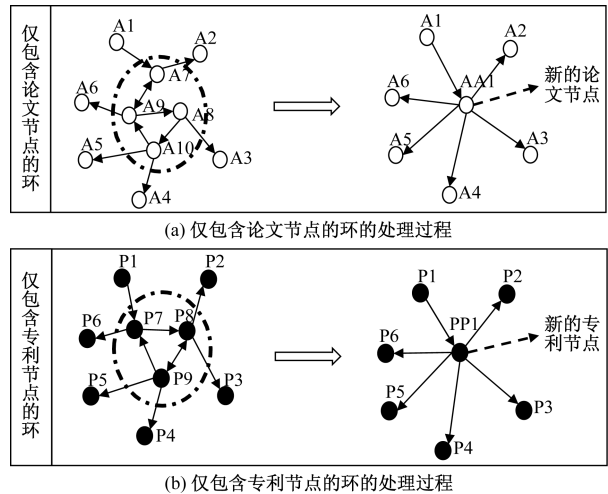


图1 环的处理过程

A开头的节点表示论文节点;AA开头的节点表示由论文节点构成的环;P开头的节点表示专利节点;PP开头的节点表示由专利节点构成的环

以揭示两者之间的关联演化路径。通过对比分析,为深入理解科学与技术之间的动态互动模式提供了新的视角,也为更准确地把握科学技术发展的规律提供了重要的理论和实证支持。

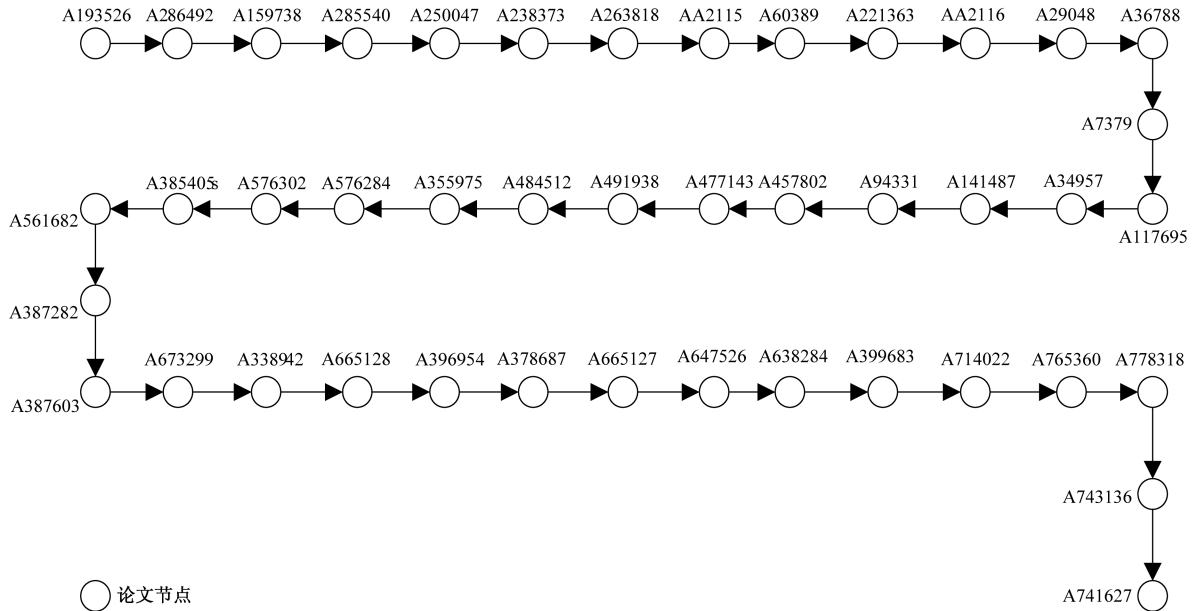
4.1 科学研究演化轨迹

在基于论文互引的引文网络研究中,运用SPLC算法来识别网络中权重最大的前两条链接,并将其视为关键路由。然后,采用关键路由主路径分析方法提取科学研究的演化轨迹,如图2所示。

在电网领域中,科学研究的前期发展主要集中于控制系统、自适应控制和模糊逻辑等方面的研究。研究内容主要包括了对非线性系统的自适应模糊回步控制、多速率网络工业过程控制、模糊系统模型降阶、观测器辅助的自适应滑模控制、LPV系统的H-infinity观测器设计等方面。在科学研究的后期发展中,科学研究多聚焦于多智能体系统和非线性控制领域,涵盖了诸如自适应控制、模糊逻辑和事件触发等方面的研究。这些研究通过理论分析和仿真实例展示了各自方法的有效性,为复杂系统控制领域提供了有价值的贡献。此外,科学研究演化轨迹揭示了多智能体系统和非线性控制领域是电网领域中较为前沿和聚焦的领域,这两个方面的研究将会是未来研究的热点。

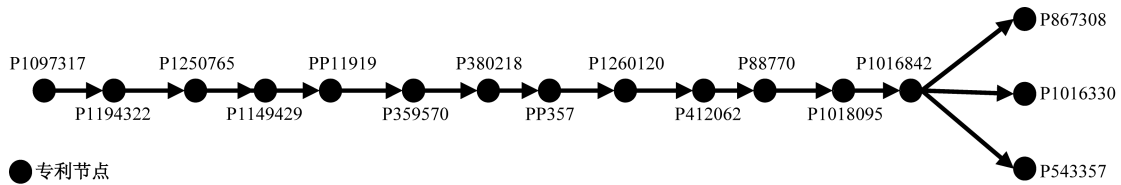
4.2 技术发展演化轨迹

在基于论文互引的引文网络研究中,同样运用了SPLC算法来识别网络中权重最大的前两条链接,并将其视为关键路由。然后,采用关键路由主路径分析方法提取技术发展的演化轨迹,如图3所示。



A 开头的节点表示论文节点;AA 开头的节点表示由论文节点构成的环

图 2 科学研究演化轨迹



P 开头的节点表示专利节点;PP 开头的节点表示由专利节点构成的环

图 3 技术发展演化轨迹

技术发展演化轨迹揭示了电网领域的技术发展过程,具体而言,揭示了一个综合的无线电能传输体系,以高效、安全和创新的方式解决了多个关键问题。在发展前期的专利技术涵盖了无线电能传输系统中的密封传感器,引入了具有无线微波接收器和发射器的控制器,着眼于优先级控制。随后,关注点转向了多径环境中的辐射物体距离计算。接下来,通过从多个天线接收无线电能的集成电路,实现了对无线电能的高效接收和处理。在发展后期,专利技术以创新方法和对无线电能传输系统的为主,突显了对无线电能传输技术的不断创新。技术发展演化轨迹提到了射频相位补偿、机器学习分类器、自发光标记柱等技术,并揭示了在无线电能传输领域的前沿创新,为未来的电能传输系统提供了丰富的技术支持和参考。

4.3 科技关联演化轨迹

采用类似的方法,得到了异构网络的最大弱连通子图的链接权重。为了深入探索科技关联视角下的科学与技术的互动模式,各选取了论文间引

用、论文引用专利、专利间引用和专利引用论文 4 种引文类型中链接权重最大的一条链接作为关键路由,进而采用关键路由主路径分析方法提取科技关联演化轨迹,如图 4 所示。从前面的分析不难发现,科学研究演化轨迹和技术发展演化轨迹的发展模式较为单一,而图 4 中科技关联演化轨迹揭示了更为复杂的互动关系以及更多的发展模式。从整体上看,科技关联演化轨迹主要分为由科学研究引发的演化轨迹和由专利技术引发的演化轨迹,并且不难发现,电网领域的发展主要由科学研究主导的,科学研究作为该领域发展的主要推动力。

路径 1 的演化轨迹以专利技术为起点展开了一系列的研究。在发展前期,演化轨迹揭示了在电力传输和存储技术初始阶段的一系列创新的跨领域的研究成果,如车辆执行器的精准控制技术、锂离子电池的材料革新、金属-有机框架(MOFs)的应用以及电解液的创新设计等。在发展后期,随着技术的成熟,研究路径转向更高级的策略,如三元和四元混合体系的采用和形态调控。这一阶段的核心

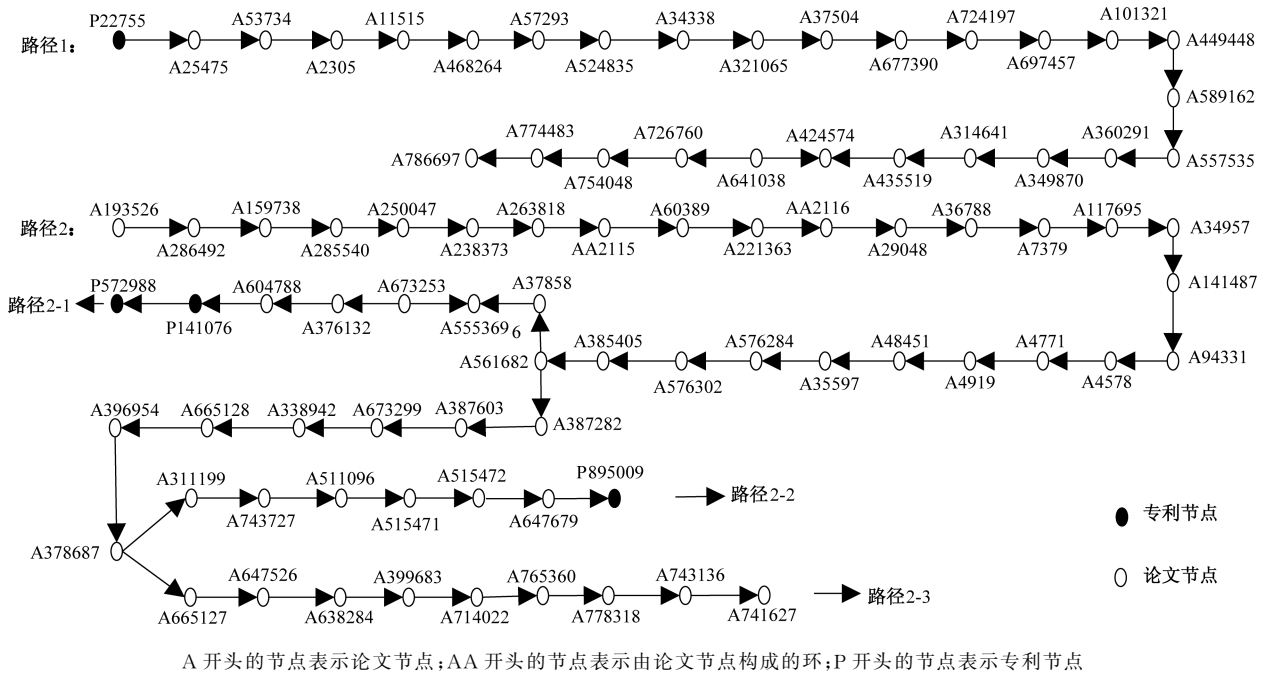


图4 科技关联演化轨迹

集中于有机光伏技术的优化,强调了材料设计和形态优化的重要性,以及对光伏技术光物理学的深入理解。通过这些高级策略,研究人员最终成功提升了有机光伏电池的能量转换效率,为有机太阳能电池的未来发展奠定了坚实基础,同时,这些研究共同推动了电力传输和存储技术的前沿发展。

路径2的演化轨迹则是以科学研究为起点展开了一系列创新研究。路径2的演化轨迹较为复杂,在后期的发展中,演化出了多条子路径,不同的子路径代表了不同的研究前沿。路径2的前期(路径分化前,即A561682前)主要集中于非线性系统控制、网络化工业过程、模糊系统、观测器设计、事件触发系统、多领域控制策略、自适应控制、神经网络控制、模糊控制等的研究。总体而言,这一研究路径从非线性系统控制的自适应模糊方法出发,逐步扩展至网络化工业过程、模型简化、观测器设计、事件触发系统等,随后着重于应对复杂系统中的未知动态、状态约束、环境不确定性、执行器故障挑战。该路径的前期发展展现了多领域交叉的研究趋势,为控制理论和应用领域提供了丰富的理论和实证支持,以及为复杂系统的稳定性和性能提供了有效的解决方案。

随后,路径2分化出了3条子路径。首先,路径2-1着重聚焦于智能系统领域中的多个关键问题,主要涵盖了自适应事件触发故障检测、异构多车系统的弹性输出一致性、网络物理系统的分布式弹性控制、微电网的谐波补偿等。这些研究关注了智能

系统中的控制、观测、共识、事件触发和电能质量等关键问题,旨在提高系统的效能、稳定性和安全性,为智能系统领域的进一步发展提供了有力的理论和实践支持。

此外,路径2还分出了子路径2-2和2-3。子路径2-2和2-3的前期研究(A387282→A378687)聚焦于智能系统领域中的控制理论和技术,包括自适应控制、模糊控制、事件触发控制、遏制控制、分散控制等方面的研究。随后,路径2-2的后期(A311199→P895009)聚焦于智能系统领域中的控制理论和技术,包括事件触发控制、迭代学习控制以及主动磁悬浮轴承系统等方面的研究,这些研究在以上方面取得了一系列创新成果。对于未来的研究,这些成果为提高系统性能、降低通信负担、实现同步振动控制等问题提供了有益的经验和方法,为智能系统领域的进一步发展指明了方向。而路径2-3的后期(A665127→A741627)聚焦于智能控制系统、多智能体系统和网络控制系统等方面的研究。这些研究致力于解决非线性、不确定性、输入限制、网络通信延迟和攻击等挑战,采用了事件触发控制、模糊逻辑系统、迭代学习控制和容错控制等技术。这些研究对未来的控制系统设计、智能化技术应用和网络化控制具有指导意义,能够提供有效的解决方案以提高系统性能、鲁棒性和安全性,并且可以推动智能系统在实际应用中更加稳健、高效、可靠地运行。

5 结论

以电网领域为研究案例,收集并利用多种引用关系构建了电网领域的引文数据集,包括论文间引用、论文引用专利、专利间引用和专利引用论文数据,基于此,构建了多种引文网络,包括论文互引的引文网络、专利互引的引文网络以及融合论文与专利互引的异构引文网络。在对网络中的环进行预处理以及提取各个引文网络的最大弱连通子图后,采用 SPLC 算法计算了最大弱连通子图的全部的链接权重,并确定 1~2 条关键路由,进而采用关键路由主路径分析方法分别提取了科学研究演化轨迹、技术发展演化轨迹和科技关联演化轨迹。

通过对比发现,相对于科学研究演化轨迹和技术发展演化轨迹中单一的发展模式,科技关联演化轨迹具有更为复杂的发展模式。科技关联演化轨迹分为由科学研究引发的演化轨迹(路径 1)和由技术发展引发的演化轨迹(路径 2),其中路径 2 分化出了 3 条子路径。路径 1 揭示了电力传输和存储技术领域的前沿发展。在路径 2 分化的 3 条子路径中,路径 2-1 聚焦于智能系统领域中的控制、观测、共识、事件触发和电能质量等关键问题,为智能系统领域的进一步发展提供了有力的理论和实践支持;路径 2-2 聚焦于智能系统领域中的控制理论和技术,为提高系统性能、降低通信负担、实现同步振动控制等问题提供了有益的经验和方法,为智能系统领域的进一步发展指明了方向;路径 2-3 聚焦于智能控制系统、多智能体系统和网络控制系统等方面的研究,这些研究对未来的控制系统设计、智能化技术应用和网络化控制具有指导意义。

本研究的核心目的是通过融合专利和论文的互引关系构建引文网络,以揭示科技互动的模式。在这一过程中,由于数据集的规模较大,在考虑引用关系时没有充分考虑引用内容的具体信息。未来的研究中,可以在主路径分析的框架下进一步考虑引用的语义和语境特征,并结合遍历权重算法来度量不同链接的权重,以提高主路径提取结果的客观性和准确性。

参考文献

- [1] ENGELKE P, WEINSTEIN E. Global strategy 2023: winning the tech race with China[R]. Washington: Atlantic Council, 2023.
- [2] SCHINDLER S, ALAMI I, DICARLO J, et al. The second cold war: US-China competition for centrality in in-

- frastructure, digital, production, and finance networks[J]. *Geopolitics*, 2024, 29(4): 1083-1120.
- [3] LEE S. US-China technology competition and the emergence of techno-economic statecraft in East Asia: high technology and economic-security nexus[J]. *Journal of Chinese Political Science*, 2024, 2024: 1-20.
- [4] 张湖波,周航,张湖源.以科技创新为导向的科研管理变革研究[J]. *科技和产业*, 2023, 23(11): 1-4.
- [5] HEGDE D, HERKENHOFF K, ZHU C. Patent publication and innovation[J]. *Journal of Political Economy*, 2023, 131(7): 1845-1903.
- [6] ZHU H. China's TOP10 breakthroughs in science and technology in 2022[J]. *National Science Review*, 2023, 10(4): nwad058.
- [7] GUAN J C, HE Y. Patent-bibliometric analysis on the Chinese science-technology linkages[J]. *Scientometrics*, 2007, 72(3): 403-425.
- [8] FUKUDA K. Science, technology and innovation ecosystem transformation toward society 5.0[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 220: 107460.
- [9] GLANZEL W, MEYER M. Patents cited in the scientific literature: an exploratory study of 'reverse' citation relations[J]. *Scientometrics*, 2003, 58(2): 415-428.
- [10] HU X, ROUSSEAU R. A new approach to explore the knowledge transition path in the evolution of science technology: from the biology of restriction enzymes to their application in biotechnology[J]. *Journal of Informetrics*, 2018, 12(3): 842-857.
- [11] DU J, LI P, GUO Q, et al. Measuring the knowledge translation and convergence in pharmaceutical innovation by funding-science-technology-innovation linkages analysis[J]. *Journal of Informetrics*, 2019, 13(1): 132-148.
- [12] 徐硕,孙童菲,罗贵缘,等.分类体系双向映射视角下的科学-技术互动分析[J]. *中国发明与专利*, 2024, 21(4): 4-15.
- [13] NARIN F, NOMA E. Is technology becoming science?[J]. *Scientometrics*, 1985, 7(3/6): 369-381.
- [14] SCHMOCH U. Tracing the knowledge transfer from science to technology as reflected in patent indicators[J]. *Scientometrics*, 1993, 26(1): 193-211.
- [15] LO S. Scientific linkage of science research and technology development: a case of genetic engineering research[J]. *Scientometrics*, 2010, 82(1): 109-120.
- [16] MCMILLAN G S, NARIN F, DEEDS D L. An analysis of the critical role of public science in innovation: the case of biotechnology[J]. *Research Policy*, 2000, 29(1): 1-8.
- [17] QU G, CHEN J, ZHANG R, et al. Technological search strategy and breakthrough innovation: an integrated approach based on main-path analysis[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 196: 122879.
- [18] 刘怡汝,孙会军.非专利引文在“科学-技术”关联研究中

- 的应用和方法研究综述[J]. 农业图书情报, 2019, 31(2): 11-19.
- [19] 杨祖国, 陈虹, 褚金涛, 等. 中国专利被《SCI》来源论文引用情况的统计与分析[J]. 情报科学, 1999(4): 422-428.
- [20] 李睿, 肖恒, 容军凤. 试论“科学关联”计量指标的不足及改进: 双向引用信息融合视角[J]. 情报理论与实践, 2013, 36(8): 6-10.
- [21] 田丽娜, 杨祖国. 基于“反向引用”视角的中国专利技术与世界科学关联分析[J]. 图书情报工作, 2017, 61(2): 107-113.
- [22] ZANG D, LIU C. Measuring the science-technology-innovation linkage and its evolution based on citation and text features of FDA-approved drugs-patents-papers [C]//27th International Conference on Science, Technology and Innovation Indicators (STI 2023). Leiden; International Conference on Science, Technology and Innovation Indicators, 2023: 1-11.
- [23] 殷媛媛. 基于论文专利引证关系的科学技术互动研究: 以立体显示为实证分析[J]. 图书情报工作, 2012, 56(16): 65-70, 74.
- [24] HUANG M H, YANG H W, CHEN D Z. Increasing science and technology linkage in fuel cells: a cross citation analysis of papers and patents[J]. Journal of Informetrics, 2015, 9(2): 237-249.
- [25] 彭彦洪, 覃佳慧, 叶鹰. 石墨烯研究中专利与论文的交叉引用分析[J]. 情报理论与实践, 2018, 41(7): 14-17.
- [26] HAMMARFELT B. Linking science to technology: the “patent paper citation” and the rise of patentometrics in the 1980s[J]. Journal of Documentation, 2021, 77(6): 1413-1429.
- [27] 刘小玲, 谭宗颖, 张超星. 国内外“科学-技术关系”研究方法述评: 聚焦文献计量方法[J]. 图书情报工作, 2015, 59(13): 142-148.
- [28] 刘自强, 许海云, 罗瑞, 等. 基于主题关联分析的科技互动模式识别方法研究[J]. 情报学报, 2019, 38(10): 997-1011.
- [29] HUMMON N P, DEREIAN P. Connectivity in a citation network: the development of DNA theory[J]. Social Networks, 1989, 11(1): 39-63.
- [30] BATAGELJ V. Efficient algorithms for citation network analysis[J]. arXiv, 2003; Cs/0309023.
- [31] LIU J S, LU L Y. An integrated approach for main path analysis: the development of the Hirsch index as an example[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2012, 63(3): 528-542.
- [32] YOON S, MUN C, RAGHAVAN N, et al. Hierarchical main path analysis to identify compositional multi-knowledge trajectories[J]. Journal of Knowledge Management, 2021, 25(2): 454-476.
- [33] WANG H, QI X, LOU S, et al. An efficient and robust improved A* algorithm for path planning[J]. Symmetry, 2021, 13(11): 2213.
- [34] KUMAR V, LAI K K, CHANG Y H, et al. A structural analysis approach to identify technology innovation and evolution path: a case of m-payment technology ecosystem[J]. Journal of Knowledge Management, 2021, 25(2): 477-499.
- [35] UMAIR M, MAJEED F, SHOAIB M, et al. Main path analysis to filter unbiased literature[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2022, 32(2): 1179-1194.
- [36] KUANG C H. Regarding weight assignment algorithms of main path analysis and the conversion of arc weights to node weights [J]. Scientometrics, 2020, 124(1): 775-782.
- [37] YU D, PAN T. Tracing the main path of interdisciplinary research considering citation preference: a case from blockchain domain[J]. Journal of Informetrics, 2021, 15(2): 101136.
- [38] XU S, WANG C, AN X, et al. A novel developmental trajectory discovery approach by integrating main path analysis and intermediacy[J]. Journal of Information Science, 2024, 50(3): 651-672.
- [39] CHEN L, XU S, ZHU L, et al. A semantic main path analysis method to identify multiple developmental trajectories[J]. Journal of Informetrics, 2023, 16(2): 101281.
- [40] VERSPAGEN B. Mapping technological trajectories as patent citation networks: a study on the history of fuel cell research[J]. Advance in Complex System, 2007, 10(1): 93-115.
- [41] 孙冰, 徐晓菲, 苏晓. 技术扩散主路径及核心企业的识别研究: 以手机芯片专利引文网络为例[J]. 情报学报, 2019, 38(2): 201-208.
- [42] LIU J S, LU L Y, HO M H C. A few notes on main path analysis[J]. Scientometrics, 2019, 119: 379-391.
- [43] XU S, HAO L, AN X, et al. Review on emerging research topics with key-route main path analysis[J]. Scientometrics, 2020, 122: 607-624.
- [44] XU S, LIU Z, AN X. Linkages among science, technology, and industry[C]//Joint Workshop of the 4th Extraction and Evaluation of Knowledge Entities from Scientific Documents and the 3rd AI + Informetrics. Santa Fe: EEKE-AII, 2023: 13-15.
- [45] 王宏, 刘沁莹, 胡玉峰, 等. 基于多源数据融合的新兴技术识别方法研究[J/OL]. 科技进步与对策, 1-11 [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1224.G3.20240508.1353.022.html>.
- [46] MARX M, FUEGI A. Reliance on science: worldwide front-page patent citations to scientific articles[J]. Strategic Management Journal, 2020, 41(9): 1572-1594.
- [47] MARX M, FUEGI A. Reliance on science by inventors: hybrid extraction of in-text patent-to-article citations [J]. Journal of Economics and Management Strategy, 2022, 31(2): 369-392.

Evolutionary Trajectories Identification in Electric Power Domain from the Perspective of Science-technology Linkages

LIU Qinying¹, WANG Hong¹, HU Yufeng², WANG Qinghong¹, WEI Ronghui²

(1. Southern Power Grid Research Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China;

2. China Southern Power Grid Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China)

Abstract: The technological transformation is progressing rapidly, and it is imperative to explore the patterns of technological development and promptly identify the direction of technological evolution. Traditional methods for revealing technological evolution trajectories primarily focus on individual innovative elements such as papers or patents, lacking comprehensive studies on their interconnections. Using the power grid domain as a case study, three citation networks are constructed: one based on paper citations, another on patent citations, and a third on mutual citations between patents and papers. Through the key-route main path analysis method, the evolutionary trajectories of scientific research, technological development, and science and technology linkage are extracted. In future research, semantic and contextual features of references and traversal weighting algorithms should be combined to improve the objectivity and accuracy of the main path analysis. Comparative analysis of these three trajectories reveals that the citation network integrating mutual citations between patents and papers can generate more complex patterns of linkage between science and technology. Simultaneously, it identifies multiple research frontiers in various sub-domains, such as sub-domains of power transmission and storage technology, intelligent systems, multi-agent systems, and network control systems.

Keywords: main path analysis; science-technology linkages; evolutionary trajectories; electric power domain