

基于多层次技术多样性的新兴 产业技术进步解构与测度

张蕊,袁潮清,李 犟,曾雨薇

(南京航空航天大学经济管理学院,江苏南京 211106)

摘要:我国新能源汽车、光伏等产业已在全球市场形成突出竞争优势,这一产业实践印证,技术多样性是新兴产业技术进步的重要表现形态。技术多样性兼具多层次结构属性与动态演化特征。首先,立足于新兴产业技术进步的动态演化视角,系统梳理、辨析并解构技术多样性的理论内涵,构建包含内部聚合层、技术扩展层、产业结构层的多层次分析框架,分别阐释技术重组、技术溢出与产业技术结构演化 3 类核心技术进步机制,完整刻画新兴产业技术进步的动态运行逻辑。然后,搭建“P-S-I”(技术组合多样性—行业溢出多样性—产业技术多样性)技术多样性概念框架,并设计相应的多层次测度体系。最后,以中国晶硅太阳能电池产业为研究对象进行实证分析,从动态视角对其技术进步进行了解构、测度和阐释。

关键词:技术创新;技术多样性;技术组合多样性;行业溢出多样性;产业技术多样性

中图分类号:G306

文献标识码:A

文章编号:1005-0566(2026)07-0052-16

Deconstructing and measuring technological progress in emerging industries: A multi-layer perspective on technological diversity

ZHANG Rui, YUAN Chaoqing, LI Jiang, ZENG Yuwei

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu, China)

Abstract: China's new energy vehicle, photovoltaic and other industries have secured prominent competitive advantages in the global marketplace. This industrial reality verifies that technological diversity constitutes a vital manifestation of technological progress in emerging industries. Characterized by multi-hierarchical structural attributes and dynamic evolutionary properties, technological diversity exhibits complex evolutionary patterns. From a dynamic evolutionary perspective of technological progress within emerging industries, this paper systematically sorts out, discriminates and deconstructs the theoretical connotations of technological diversity. A multi-layer analytical framework consisting of the internal aggregation layer, technology expansion layer and industrial structure layer is constructed to elaborate three core mechanisms driving technological progress, namely technological recombination, technology spillovers and the evolution of industrial technological structure, which collectively delineate the dynamic operational logic of technological advancement in emerging industries. On this basis, this study establishes a “P-S-I” (Technological Portfolio Diversity-Sector Spillover Diversity-Industrial Technological Diversity) conceptual framework of technological diversity and develops a corresponding multi-hierarchical measurement system. Finally, this paper takes China's crystalline silicon solar cell industry as the research sample to conduct empirical analysis, so as to deconstruct, quantify and interpret its

基金项目:国家自然科学基金项目“产业政策、技术多样性与新兴产业技术水平提升的多层次学习效应”(72374102)。

作者简介:张蕊(1995—),女,江苏泰州人,南京航空航天大学经济管理学院博士研究生,研究方向为创新管理。

technological progress from a dynamic perspective.

Key words: innovation; technological diversity; technology portfolio diversity; sector spillover diversity; industry technological diversity

随着新一轮科技革命和产业变革的持续深化,以及全球科技竞争格局不断调整,新兴产业已成为各国培育未来竞争优势和提升国际竞争力的重要领域^[1-2]。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出要加快发展新质生产力,强化战略性新兴产业对现代化经济体系的支撑作用,构建自主可控、安全高效的现代产业体系。新兴产业的高质量发展是基本实现中国式现代化强有力的支撑^[3]。

技术创新是新兴产业高质量发展的根本动力。这类产业的技术进步呈现出多路径并行、协同演化、动态迭代的复杂特征,技术多样性正是这一过程的典型表现^[4]。中国光伏产业,先后演化出BSF、PERC、TOPCon、HJT等多条技术路线,各路线在光电转换效率、制造成本、工艺兼容性等维度持续优化迭代,奠定了中国光伏产业全球领先地位。同样,新能源汽车领域形成了混合动力、纯电动、燃料电池及增程式等多元技术路径,不同技术方案探索与升级,推动动力电池能量密度提升、电驱系统提效、电池成本下降,实现了我国新能源汽车产业的弯道超车。这些产业实践充分表明,技术多样性是帮助新兴产业避免过早技术锁定、实现技术代际跃迁的重要基础。因此,对新兴产业技术多样性进行系统刻画和科学测度,有助于深化对产业技术进步的理解。

现有研究主要从创新投入^[5]、产业空间^[6]、企业边界^[7]、技术范畴^[8]等角度对技术多样性展开定义,并普遍采用HHI指数^[9]、Rao-Stirling指数^[10]等传统指标,基于专利数据进行静态测度,为理解技术多样性的内涵与测度奠定了重要基础。然而,既有研究多将技术多样性视为技术类别分布、技术差异程度等结构性特征,研究重点集中于技术广度、相关性与复杂性层面。虽然这些研究有效揭示了技术结构特征及其创新效应,但总体上仍侧重于对技术分布状态的刻画,难以进一步识别技术多样性的不同来源及其形成机制,也难

以全面揭示新兴产业技术结构的层次性特征及其演化规律。与此同时,现有研究多立足于一般产业或企业情境,对新兴产业技术快速迭代、跨领域技术融合以及多路径并行演化等特征关注相对不足。相较于传统产业,新兴产业的技术进步并非单纯表现为技术类别数量的增加,而是由路径内部技术重组、跨行业技术溢出以及产业技术结构演化共同塑造的动态过程。在这一过程中,技术多样性不仅反映技术分布差异,还体现技术组合方式和技术来源结构的多层次化特征,并呈现出显著的动态演化特性。因此,传统单一维度的技术多样性指标难以同时刻画技术组合、技术扩展与产业技术结构演化等不同层级特征,从而难以全面反映新兴产业技术进步过程。

基于此,本文构建“技术组合多样性—行业溢出多样性—产业技术多样性”(portfolio-spillover-industry, P-S-I)多层次技术多样性分析框架。该框架从技术组合、跨行业技术溢出、产业技术结构3个层次解构技术多样性,依次对应技术组合、行业溢出、产业技术3层多样性,以系统表征新兴产业技术进步的结构特征及其动态演化过程。在此基础上,本文进一步开发相应的多层次测度方法,并以中国晶硅太阳能电池产业为研究对象,对技术进步进行解构、测度与分析。

本文的贡献主要体现在以下3个方面:第一,突破现有技术多样性研究以单一技术分布为核心的分析范式,提出包含技术组合、行业溢出和产业技术3个层次的技术多样性概念框架,拓展了技术多样性的理论内涵;第二,从技术重组、跨行业技术溢出与产业技术结构演化3个层次,对新兴产业技术进步进行解构,揭示技术多样性在不同层次上的结构特征,为理解新兴产业技术进步提供新的分析视角;第三,构建与上述理论框架相对应的多层次测度体系,实现对不同层次技术多样性的识别与量化,为新兴产业技术进步研究提供新的测度工具。

一、理论基础与概念框架

(一) 技术多样性内涵和概念框架

多样性指的是一个系统中各要素之间的差异程度^[11]。技术多样性最初源于“知识多样性”的概念演化,由 Nelson^[12]首次提出,认为知识的多样性拓宽了技术选择的可能性,从而促进技术创新沿着多样化路径发展。Kodama^[13]提出,技术多样性是指企业在核心产品技术之外开展研发活动,通过进入非核心技术领域以拓展其技术基础,并建议以核心技术领域以外研发投入的相对比重作为衡量指标,是该概念的最早提出者。此后,学者从不同的角度对技术多样性的内涵与概念进行界定。第一,从创新投入的角度。在 Kodama 的基础上,Quintana-garcía 等^[5]认为,技术多样性体现为企业围绕多样化市场需求整合异质技术资源,并在核心产品领域之外开展研发活动,其水平可通过非核心领域研发投入占比加以衡量。毕静煜等^[14]从外部技术研发获取视角出发,认为技术多样性体现为企业在研发过程中,依托研发合作关系引入并整合多来源、异质化的外部研发资源。第二,从产业空间角度。冉征等^[6]和王问芳等^[15]提出区域产业布局、创新配套体系与产业链配套水平的差异,使得各地区主导技术路线、研发攻关方向呈现差异化特征,进而在宏观层面塑造出产业整体的技术多元格局。第三,从企业边界的角度。丁焰等^[7]提出,大型企业通常具备多元化的技术能力,该能力覆盖企业核心技术范畴以外的各类技术板块,且伴随企业发展,其技术边界呈现持续拓展的特征。王耀德等^[16]认为技术多样性体现为企业依托自身核心技术根基持续拓宽技术基底,将创新研发活动延伸至更广的技术范畴,最终实现企业技术边界的动态扩张。第四,从技术范畴的角度。越来越多的学者认识到技术多样化的本质是技术体系的多元拓展,彭凯等^[8]认为技术多样性是产业整体技术覆盖范畴的扩张。杨靛等^[17]指出技术多样性表现为企业创新研发涉足的技术赛道更为丰富、技术布局范围更为宽泛。何郁冰等^[18]提出,技术多样化体现为产品生产与工艺研发所依托的技术体系、技术原理呈现多元分

布的特征。

既有研究普遍认为,技术多样性是刻画技术类别分布与技术路径差异化结构的重要视角,对理解产业技术创新与技术进步具有关键意义。然而,现有研究对技术多样性的理解仍存在一定局限。第一,多将技术多样性视为技术领域分布状态的表征,重点关注技术类别的数量、分布及差异程度,难以进一步识别技术重组、跨行业技术吸收以及技术路径演化等不同来源所形成的多样性特征。第二,往往以技术领域为基本分析单元,忽视技术体系内部不同技术路径之间的结构差异及其层次化特征,难以揭示技术多样性的内在结构。第三,多采用静态视角进行分析,未能充分体现技术结构在时间维度上的动态演化过程。上述局限在新兴产业研究情境下显得尤为突出。相较于技术范式已相对稳定的传统产业,新兴产业技术体系尚处于持续演化阶段,其技术更新频率高、多路径演化活跃,创新主体间的关联结构更为复杂,产业技术进步表现出明显的多层次结构属性与动态演化特征。在此背景下,若继续沿用以单一企业为中心、基于静态技术分类的分析框架,将难以准确捕捉新兴产业技术多样性的结构特征与演化机制,从而制约对产业创新动态与技术进步的深入理解。

为此,本文从技术进步生成机制视角提出技术多样性的新内涵。借鉴 Chatzistamoulou 等^[19]和 Tsekouras 等^[20]关于技术层次结构的研究思路,本文认为,产业技术体系是由多层次技术结构嵌套形成的复杂系统,不同层次的技术结构对应不同的技术组合方式和技术进步机制。其中,微观层面的技术要素重组推动既有技术路径的深化发展,中观层面的跨行业技术吸收促进技术边界拓展,宏观层面的技术路径竞争与协同则推动产业技术结构持续迭代。基于此,本文构建“技术组合多样性—行业溢出多样性—产业技术多样性”新兴产业技术多样性概念框架(见图 1)。具体而言,技术组合多样性反映产业内部技术要素的重组程度,体现技术路径内部的技术整合能力;行业溢出多样性反映产业从外部行业吸收和融合异质性技

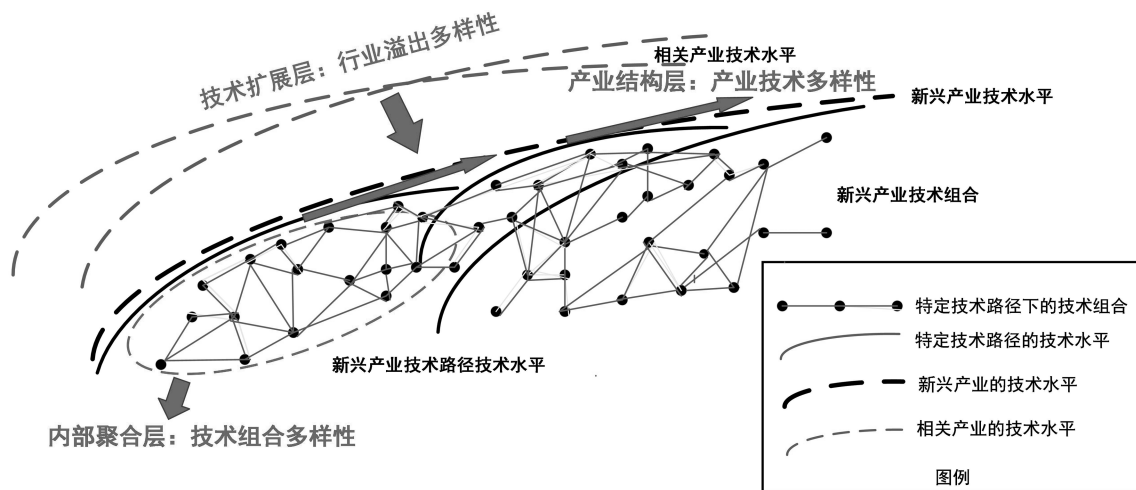


图1 “P-S-I”新兴产业技术多样性概念框架

术的程度,体现跨领域技术扩展能力;产业技术多样性反映不同技术路径之间的竞争与协同状态,体现产业整体技术结构的演化特征。三者并非独立并列关系,而是呈现由微观到宏观、由路径深化到结构演化的递进嵌套关系,共同构成“路径内部重组—跨领域扩展—产业结构演化”的技术进步逻辑。

(1)内部聚合层:既有研究普遍认为,技术重组是推动技术创新的重要机制,其核心在于对既有技术要素的重构,从而在原有技术基础上生成更具新颖性的技术形态^[21-22]。从资源基础观视角来看,创新的新颖性并非源于技术要素数量的简单扩张,而是体现在对企业内部既有技术资源的创造性整合之中^[23]。通过在既定技术体系内部持续调整技术要素的组合结构,创新主体能够在不改变既有技术路径的前提下实现技术性能的跃迁,并推动高质量创新产出的形成。在此基础上,本文将新兴产业技术多样性的内部聚合层界定为技术组合多样性,即技术路径内部依托既有技术开展要素重组、优化组合结构的过程。该层面所涉及的技术要素之间技术距离较近、相关性较强,技术耦合程度较高,其所形成的多样性主要表现为同一技术轨道内部的组合扩展与结构深化。随着路径内相关技术要素在长期积累中的耦合与重构,技术体系内部的结构复杂性逐步提升,推动产业技术能力实现渐进式演进。

(2)技术扩展层:现代技术体系通常由多种相

互关联的技术要素与功能模块构成,其研发活动高度依赖于来自不同行业的多样化技术基础^[24]。根据产业整合理论,不同行业之间普遍存在复杂而紧密的技术关联,这种关联往往通过跨行业技术溢出的形式得以体现,即技术在行业间流动并被吸收、整合与重构,从而不断丰富产业技术体系^[25-26]。既有研究表明,跨行业技术溢出为创新活动提供了异质化的技术来源,相较于单一行业内部的技术积累,更容易形成多元化的技术要素结构,并孕育具有突破潜力的创新成果^[27]。基于此,本文将新兴产业技术多样性的扩展层界定为行业溢出多样性。该层面强调跨行业技术的吸收与融合,是技术体系向更高复杂度结构跃迁的重要过程。相较于内部聚合层所体现的高相关性与近技术距离特征,技术扩展层所涉及的技术距离更远、相关性相对较低,其多样性来源于外部行业技术要素在焦点行业中的结构嵌入与重组。随着跨行业技术的吸收与融合,焦点行业内部的技术要素结构日益呈现异质化与多元化特征,技术体系的复杂层级不断深化,从而增强产业突破性创新能力。

(3)产业结构层:既有研究表明,产业技术演进通常沿着以渐进式创新为主导的连续路径展开,但在突破性创新出现时,原有技术体系可能发生结构性调整,并由此开启新的技术演化阶段^[28]。新技术的出现不仅拓展了产业技术发展空间,也推动产业内部形成多条并行演化的技术路径。不

同技术路径在性能、效率等技术方面呈现出差异化特征,并在持续演化过程中共同塑造产业整体技术结构^[29]。从产业层面来看,技术进步不仅表现为单一路径内部的持续优化,也表现为产业内部技术路径多样化的结构演化过程。当多条技术路径并存发展时,产业技术体系不再依赖单一路径扩展,而是呈现出多路径协同演化、结构持续演进的特征。技术结构的丰富程度、不同技术路径的发展状态以及技术资源在不同路径之间的分布状况,反映了产业技术体系的整体演化水平^[30]。基于此,本文将新兴产业技术多样性的产业结构层界定为产业技术多样性。该层面反映产业内部不同技术路径在技术能力、技术来源及发展状态等方面所形成的结构差异,是产业技术体系在长期演化过程中呈现出的整体结构特征。相较于内部聚合层强调路径内部技术要素的重组与组合优化,以及技术扩展层强调跨行业技术吸收与融合,产业结构层关注的是产业内部技术结构的整体分布状态及其演化特征,体现不同技术路径共同作用下所形成的技术结构丰富性与多样化程度。

(二) 技术多样性的测度

关于如何准确测度技术多样性,现有文献主要采取两类指标:一类是主观指标,寿柯炎等^[31]设计量表,通过问卷调查的方式收集企业技术多样性的数据;另一类是客观性指标,现有研究多采用专利和研发支出测度技术多样性。Granstran 等^[9]较早引入 Herfindahl-Hirschman Index (HHI) 指数,通过企业在不同技术领域的研发投入分布来衡量其在非核心技术领域的集聚程度,从而刻画技术多样性水平。在此基础上,杨武等^[32]进一步提出可利用专利数据表征技术多样性,并采用 HHI 指数对产业在相关技术领域中的技术分布状况进行量化分析。此后,基于专利数据测度技术多样性逐渐成为学界共识,并被广泛应用于企业技术结构与创新行为研究。在具体测度方法上,除 HHI 指数外,学者还发展并应用了多种反映技术分布特征的多样性指标,包括 Shannon 指数和 Rao-Stirling 指数等。夏舒娴等^[33]采用 Shannon 指数方

法,以企业专利的国际专利分类 (IPC) 为基础,对中国技术广度进行量化分析,重点刻画中国创新活动在不同技术领域之间的分布结构及其数量差异。Leydesdorff 等^[10]采用 Rao-Stirling 指数对企业技术领域的多样性进行测度,该指标在综合考虑技术类别分布的同时,引入技术之间差异程度的权重设定,通过专利 IPC 分类与技术相似度计算反映技术多样性水平。杨杰等^[34]基于共被引关系刻画技术间距离,并结合类别占比,采用 Rao-Stirling 指数测度技术多样性。

根据现有研究,专利数据因与技术之间具有明确的对应关系,且所记载技术特征信息能够较为全面地反映技术要素的组合模式、技术来源结构,已成为测度技术多样性的核心数据来源,有助于系统识别产业技术在其发展过程中表现出的多样性特征。然而,既有研究多基于对技术多样性相对单一的理解构建测度方法,难以涵盖技术融合、技术溢出与产业技术结构演化的内涵特征。因此,本文在传统测度方法的基础上,进一步拓展分析框架,依托专利数据,从技术组合多样性、行业溢出多样性及产业技术多样性 3 个维度,构建能够全面反映新兴产业技术多样性特征的综合测度体系。

在明确理论框架和测度方法后,表 1 汇总梳理了技术组合多样性、行业溢出多样性和产业技术多样性的核心内涵及其主要特征。

二、方法与研究设计

创新研究建议将专利数据作为技术发展的一种衡量标准^[35]。因此,本文构建了一套基于专利数据的新兴产业技术多样性测度方法。该方法具体涵盖 3 个层次:首先,基于同一技术路径内部不同技术专利的组合结构,测算内部聚合层,即技术组合多样性;其次,通过计算焦点专利与其后向引用专利之间的行业距离,并结合外部行业技术来源的分布特征,测度技术扩展层,即行业溢出多样性;最后,以技术组合多样性和行业溢出多样性共同表征不同技术路径的综合能力,并依据各技术路径综合能力的分布结构,测算产业结构层,即产业技术多样性。

表1 技术多样性核心概念对照表

概念	技术组合多样性	行业溢出多样性	产业技术多样性
定义	单条技术路径内部,技术要素重组、结构优化的复杂程度	单条技术路径跨行业吸收、整合外部技术的广度与异质性	不同技术路径在内部技术组合能力与外部行业技术溢出能力共同作用下所形成的产业整体技术结构多样化状态
理论来源	技术重组理论、组合创新理论	技术溢出理论、吸收能力理论	产业演化理论、路径依赖理论
分析层级	内部聚合层	技术扩展层	产业结构层
测度对象	单一路径内部技术结构	单一路径外部技术来源	产业整体技术路径格局
数据单元	路径内专利 IPC 分类	专利后引 IPC-行业映射	不同技术路径
多样性来源	路径内部技术组合深化	外部行业技术扩展	多路径综合能力并存与动态分布
预期解释功能	解释产业内部技术要素重组、技术结构深化与路径内技术协同优化	解释外部行业技术嵌入、跨行业技术扩散与技术边界扩展	解释产业技术结构复杂性、路径竞争空间、技术替代能力与路径锁定风险
典型表现	PERC 路径内背钝化、浆料、电极等工艺协同优化	半导体、装备制造、材料工程等行业技术向太阳能电池行业扩散	TOPCon、HJT、IBC 等多路径并行竞争与协同

(一)技术组合多样性测度方法

技术组合多样性(TD_p)用于刻画单一技术路径内部不同技术要素之间的组合与重组程度,反映技术体系内部的结构复杂性及其技术整合能力。本文采用国际专利分类体系(International Patent Classification, IPC)识别技术类别。IPC 作为国际通用的技术分类标准,具有明确的层级嵌套结构,依次包括部、大类、小类、大组和小组 5 个层级。考虑到技术识别精度与测度稳定性的平衡,本文选取 6 位 IPC 代码对应的大组层级作为基础技术分类单元。例如, H01L31 中, H 表示“电学”, H01 表示“基本电气元件”, H01L 表示“半导体器件”, H01L31 则表示“用于将光辐射转化为电能的半导体器件”,能够较为准确地识别晶硅太阳能电池相关核心技术领域。

技术组合多样性本质上体现为技术路径内部不同技术要素之间的组合结构差异。参考 Rao-Stirling 多样性指数的理论框架,技术组合多样性包含丰富度、平衡度和差异度 3 个核心维度。本文

认为,技术组合多样性不仅取决于不同技术类别的分布状况,还受到技术类别之间差异程度的影响。因此,在传统 Rao-Stirling 指数基础上,结合 IPC 分类体系的层级特征,构建技术组合多样性测度指标:

$$TD_{p,t} = \ln(N_t) \sum_{k=1}^K \sum_{j=1, j \neq k}^K d_{kj} P_{k,t} P_{j,t}$$

其中, $TD_{p,t}$ 表示技术路径在年份 t 的内部技术组合多样性水平; N_t 表示该技术路径在年份 t 的有效专利数量; K 表示该年份涉及的 IPC 技术类别总数; $P_{k,t}$ 与 $P_{j,t}$ 分别表示 IPC 类别 k 与 j 在当年技术结构中的权重占比; d_{kj} 表示 IPC 类别 k 与 j 之间的技术距离。

现有研究通常采用余弦距离衡量技术差异程度^[10],但该方法主要基于技术共现关系构建距离矩阵,难以充分反映 IPC 分类体系所蕴含的层级关联特征。为此,本文借鉴 Trajtenberg 等^[36]关于技术距离的研究思路,根据 IPC 分类层级之间的嵌套关系构建技术距离矩阵。当两项技术所属 IPC 分类完全一致时,技术距离记为 0;当两项技术在 6 位大组层面不同时,距离赋值为 0.25;当 4 位小类层面不同时,距离赋值为 0.50;当 3 位大类层面不同时,距离赋值为 0.75;当 1 位部层面不同时,距离赋值为 1。随着分类层级差异不断扩大,不同技术在基础和原理上的差异也逐步增大,相应技术距离赋值随之提高。

考虑到单项专利可能同时对应多个 IPC 分类号,若直接采用完整计数方式,容易导致技术类别权重被重复计算,从而影响技术分布结构的准确识别。因此,本文采用分数计数法对多 IPC 专利进行处理。具体而言,若某项专利同时归属于 n 个 IPC 类别,则将该专利权重平均分配至各技术类别,每个类别获得 $1/n$ 的权重。例如,一项专利同时属于 H01L31 和 H01L27 两个 IPC 类别,则两个类别分别获得 0.5 的权重。随后,对同一年份内所有专利的 IPC 权重进行汇总,并据此计算各技术类别在技术路径中的分布比例。此外,不同年份技术路径所包含的专利数量存在显著差异。若仅采用传统 Rao-Stirling 指数进行测度,可能导致

技术类别数量扩张的特征被低估,从而影响跨时期比较结果。为此,本文在指数构建过程中引入 $\ln(N_t)$ 作为规模修正项,使指标在反映技术结构差异性的同时,兼顾技术规模扩张所带来的多样性变化,从而提高不同年份之间的可比性与测度稳定性。

基于上述方法,技术组合多样性的计算过程包括:首先提取特定技术路径在某一年度的全部有效专利及其 IPC 分类信息;其次采用分数计数法处理多 IPC 专利,并计算各技术类别权重占比;再次依据 IPC 分类层级构建技术距离矩阵;最后代入上述公式计算得到技术组合多样性指数。

(二)行业溢出多样性测度方法

行业溢出多样性(TD_s)用于刻画技术路径在演化过程中吸收外部行业异质性技术的广度与差异程度,反映产业跨行业技术扩展能力。本文依据 2017 年颁布的《国民经济行业分类》(CNEIC)识别专利所属行业类别。CNEIC 采用门类、大类、中类、小类的层级结构,考虑行业识别精度与测度稳定性的平衡,本文选择三位码大类作为基础行业分类单元。例如,代码 C39 表示“计算机、通信和其他电子设备制造业”。为建立专利与行业之间的对应关系,本文依据《国际专利分类与国民经济行业分类参照关系表(2018)》构建 IPC 与 CNEIC 映射关系,实现专利技术与行业类别的匹配。

在技术溢出的研究中,技术多样性和技术距离是两个核心概念^[37],二者对后续技术生成具有关键影响。因此,行业溢出多样性的形成既取决于外部行业技术来源的丰富程度,也取决于外部行业与焦点行业之间的技术距离。因此,本文在 Rao-Stirling 多样性指数基础上,引入专利后向引用形成的行业距离,构建行业溢出多样性测度指标:

$$TD_{s,t} = \ln(D_t + 1) \sum_{p=1}^Q \sum_{q=1, p \neq q}^Q d_{pq} P_{p,t} P_{q,t}$$

其中

$$D_t = \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{M_t} D_i$$

$$D_i = \sum_{b=1}^{NCITED_i} \frac{DISTANCE_{ib}}{NCITED_i}$$

$$DISTANCE_{ib} = \sum_{f=1}^{NASSIGNED_i} \frac{\sum_{c=1}^{NASSIGNED_b} DISTANCE_{fc}}{NASSIGNED_b} \times \frac{1}{NASSIGNED_i}$$

其中, $TD_{s,t}$ 表示技术路径在年份 t 的行业溢出多样性; D_t 表示年份 t 的平均行业距离; M_t 表示年份 t 的焦点专利数量; D_i 表示焦点专利 i 的平均行业距离; $NCITED_i$ 表示焦点专利 i 的后向引用数量; $DISTANCE_{ib}$ 表示焦点专利 i 与被引专利 b 之间的行业距离; $DISTANCE_{fc}$ 表示焦点专利行业 f 与被引专利行业 c 的行业距离; $NASSIGNED_i$ 表示焦点专利 i 对应的 CNEIC 行业数量; $NASSIGNED_b$ 表示被引专利 b 对应的 CNEIC 行业数量; $P_{p,t}$ 和 $P_{q,t}$ 分别表示行业类别 p 和 q 在年份 t 中的技术要素占比; d_{pq} 表示行业类别 p 与 q 之间的行业距离。

参考行业距离测度研究,并结合 CNEIC 分类体系的层级嵌套结构,本文按照行业分类差异程度赋予距离权重。当两个行业代码完全一致时,行业距离记为 0;当处于同一门类但三位码大类不同(如 C39 与 C36)时,行业距离记为 0.5;当所属门类不同(如 C39 与 D44)时,行业距离记为 1。行业层级差异越大,表明技术基础和原理差异越显著,相应行业距离越高。考虑到同一专利可能同时对应多个 CNEIC 行业类别,若直接采用完整计数方式容易导致行业归属重复计算。因此,本文采用逐行业平均法进行处理。首先,计算焦点专利内部每个行业与被引专利行业集合之间的平均距离;然后,对焦点专利内部各行业的距离结果进行平均,从而获得专利间行业距离。该方法能够有效避免多行业归属带来的权重偏误。对于不存在后向引用的专利,本文认为其未表现出明显的跨行业技术吸收行为,因此将其行业距离记为 0,并保留在样本中参与统计,以避免因删除样本导致测度偏差。此外,本文在指标构建过程中引入 $\ln(D_t + 1)$ 作为规模修正项,以避免 D_t 取值小于 1 时可能产生的对数负值问题,使行业溢出多样性在反映行业知识异质性的同时,兼顾引用规模变

化带来的影响。值得注意的是,专利引用关系虽被广泛用于刻画技术关联与技术扩展,但其本质上属于技术流动的代理变量,并不完全等同于真实技术溢出,可能受到引用来源与审查程序等因素影响。因此,本文所构建的行业溢出多样性主要用于反映晶硅太阳能电池产业跨行业技术吸收与技术扩展的结构特征,并据此表征产业潜在的跨行业技术整合能力。

行业溢出多样性的具体计算过程包括:首先提取焦点专利及其后向引用专利;其次建立 IPC 与 CNEIC 映射关系;再次计算焦点专利与被引专利之间的行业距离;随后计算年份平均行业距离;最后结合行业类别分布及行业距离矩阵,计算得到行业溢出多样性指数。

(三) 产业技术多样性测度方法

产业技术多样性 (TD_i) 用于刻画产业内部不同技术路径所形成的整体技术结构多样化状态,反映产业技术体系中不同技术路径并存发展的丰富程度及其结构分布特征。考虑到产业技术进步不仅来源于技术路径内部的技术重组,也来源于跨行业技术吸收与技术扩展。因此,产业技术多样性的形成既受到技术组合多样性的影响,也受到行业溢出多样性的影响。

现有研究在测度产业层面的技术结构时,多采用技术路线占比、市场份额或熵统计等方法进行分析。考虑到产业技术多样性本质上体现为不同技术路径综合能力的分布状态,而非单纯技术数量的增加,因此本文借鉴 Shannon 熵指数的思想,以不同技术路径综合多样性水平的分布结构为基础构建产业技术多样性测度指标:

$$TD_{i,t} = \ln(T_i) \left(- \sum_{m=1}^{T_i} P_{m,t} \ln P_{m,t} \right)$$

其中, $TD_{i,t}$ 表示年份 t 的产业技术多样性水平; T_i 表示年份 t 产业内部共存的技术路径数量; $p_{m,t}$ 表示技术路径 m 在年份 t 的综合多样性权重。

产业技术多样性的形成不仅取决于技术路径内部的技术重组能力,也取决于其跨行业技术吸收与扩展能力。因此,本文将技术组合多样性与行业溢出多样性共同作为技术路径综合能力的重要

要来源。考虑到两类指标分别基于 IPC 技术距离和 CNEIC 行业距离构建,其量纲和取值范围存在差异,为保证二者具有可比性,本文首先采用 Min-Max 方法进行标准化处理。

$$\hat{d}_{m,p,t} = \frac{TD_{p,m,t} - TD_{p,\min}}{TD_{p,\max} - TD_{p,\min}}$$

$$\hat{d}_{m,s,t} = \frac{TD_{s,m,t} - TD_{s,\min}}{TD_{s,\max} - TD_{s,\min}}$$

其中, $\hat{d}_{m,p,t}$ 和 $\hat{d}_{m,s,t}$ 分别表示技术路径 m 在年份 t 的标准化技术组合多样性和标准化行业溢出多样性。

进一步地,构建技术路径综合多样性水平:

$$d_{m,t} = 0.5\hat{d}_{m,p,t} + 0.5\hat{d}_{m,s,t}$$

其中, $d_{m,t}$ 表示技术路径 m 在年份 t 的综合多样性水平。由于现有研究尚未形成关于路径内部技术重组能力与跨行业技术扩展能力相对重要性的统一理论共识,因此本文采用等权重法进行处理,分别赋予技术组合多样性与行业溢出多样性 0.5 的权重,以降低人为赋权带来的主观偏误。

随后,根据各技术路径综合多样性水平在产业中的相对占比计算路径权重:

$$P_{m,t} = \frac{d_{m,t}}{\sum_{m=1}^{T_i} d_{m,t}}$$

产业内部不同技术路径的综合能力分布越均衡,产业技术多样性越高;反之,产业资源持续向少数技术路径集中时,产业技术多样性则趋于下降。此外,不同年份产业内部共存技术路径数量存在差异。若仅采用传统 Shannon 熵指数进行测度,可能导致技术路径规模扩张的信息被低估,从而影响跨时期比较结果。为此,本文在指数构建过程中引入 $\ln(T_i)$ 作为规模修正项,使指标在反映技术路径分布结构差异的同时,兼顾技术路径数量变化所带来的多样性变化。

基于上述方法,产业技术多样性的具体计算过程是:首先计算各技术路径在某一年度的技术组合多样性与行业溢出多样性;其次采用 Min-Max 方法对两类多样性指标进行标准化处理;再次依据标准化结果计算各技术路径的综合多样性水平及其权重占比;最后结合技术路径权重分布和路

径数量信息,利用 Shannon 熵方法计算产业技术多样性指数。

三、实证分析

(一) 研究案例

中国晶硅太阳能电池产业技术体系较为成熟,系统集成程度较高,技术创新活动较为活跃^[38],具有较好的研究代表性。自 1954 年晶硅电池技术问世以来,该领域经历了由 P 型向 N 型的多轮关键技术路径迭代,尤其是在 PERC、TOPCon、HJT 等多技术路线并行发展的阶段,形成了相对清晰且连续的技术演进轨迹。与此同时,该产业在技术实现层面高度依赖半导体材料、精密装备制造、材料工程与自动化控制等相关行业的协同支撑,呈现出显著的跨领域技术整合特征。在多次产业周期波动与国际竞争格局调整过程中,中国晶硅太阳能电池产业表现出明显的结构性演化特征。在技术路径持续分化与替代过程中,产业内部企业结构亦发生显著调整,部分早期企业逐步退出市场,而隆基绿能、晶科能源等企业依托技术布局优势实现快速成长,并逐步成为全球主要晶硅太阳能电池制造企业。从全球产业地位来看,中国晶硅太阳能电池在产能与市场份额方面处于领先地位,专利申请规模亦居全球前列,相关创新活动呈现较高密集度与持续性。此外,该领域在 IPC 与 CNEIC 分类体系中界定清晰,企业专利覆盖市场比例达 95.9%,为基于专利数据构建结构化技术指标并开展实证分析提供了较为可靠的数据基础。

(二) 数据来源与处理

本文采用专利数量统计与专利后向引用分析,分别用于衡量技术规模演化与技术扩展过程^[39]。进一步地,本文以专利家族单元作为基础分析单元(以下简称“专利”),依托 Innography 专利数据库对中国晶硅太阳能电池产业相关专利进行系统检索。考虑到晶硅太阳能电池产业自 2005 年后进入快速产业化阶段,且主要技术路线逐步形成并演化,本文将样本时间范围设定为 2005—2023 年。研究对象涵盖 BSF、PERC、PERT、TOPCon、IBC、HJT 和 HBC 等 7 类代表性高效晶硅太阳能电池技术路线。为保证检索结果

与研究对象的一致性,本文参考王委委等^[40]关于晶硅太阳能电池专利研究的检索方法,结合技术路线关键词与 IPC 体系构建检索策略。具体检索式为:TIABC = (晶硅电池 or 太阳能电池 or “photovoltaic cell” or “solar cell” or “photovoltaic battery”) and (BSF or PERC or TOPCon or IBC or HJT or HBC)) AND (IPC-LOW = (H01L21 or H01L31))。其中,TIABC 表示检索范围包括标题、摘要和权利要求;IPC-LOW 表示专利所属国际专利分类。H01L21 和 H01L31 分别对应半导体器件制造工艺及光电转换半导体器件等与晶硅太阳能电池技术密切相关的核心技术领域。在此基础上,进一步限定申请人国别为中国,以保证研究对象与中国晶硅太阳能电池产业相匹配。

为提高样本质量并降低检索偏误,本文进一步对检索结果进行了人工校验和准确性评估。具体而言,分别选取行业龙头企业核心专利清单、光伏产业技术路线白皮书及行业发展报告所列代表性专利,以及专家人工标注样本作为基准数据集,对检索结果进行交叉验证。结果显示,本文检索策略对目标技术路线专利的召回率达到 92.4%,准确率达到 94.1%,表明所构建的检索式能够较为全面地覆盖晶硅太阳能电池主要技术路线专利,并有效控制无关样本的引入。

按照上述检索规则,共获得 2005—2023 年中国晶硅太阳能电池相关授权专利 3 923 项。进一步剔除检索时段内已失效专利后,整理得到 7 类技术路线的历年有效专利数据(见图 2)。同时,为测度行业溢出多样性,本文利用基于 Matlab 开发的

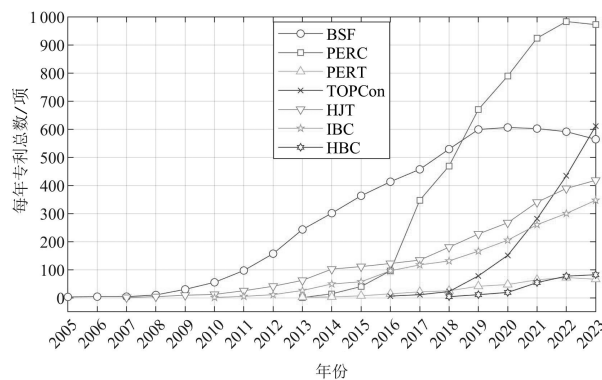


图2 7种晶硅太阳能电池技术有效专利数

匹配算法提取专利后向引用信息,将焦点专利与被引专利匹配关联,构建专利引用网络。最终共识别有效后向引用关系 13 421 项(见表 2),为后续行业溢出多样性测算提供数据支撑。

表 2 7 种晶硅太阳能电池技术授权专利和后向引用专利

单位:项

种类	授权专利	后向引用专利
BSF 电池	924	3 120
PERC 电池	1 199	4 168
PERT 电池	85	365
TOPCon 电池	666	2 070
HJT 电池	539	1 682
IBC 电池	413	1 710
HBC 电池	97	306
总和	3 923	13 421

(三)技术组合多样性演化分析

根据技术组合多样性测度方法,本文测算了 2005—2023 年 7 类晶硅太阳能电池技术路线的技术组合多样性水平,结果如图 3 所示。

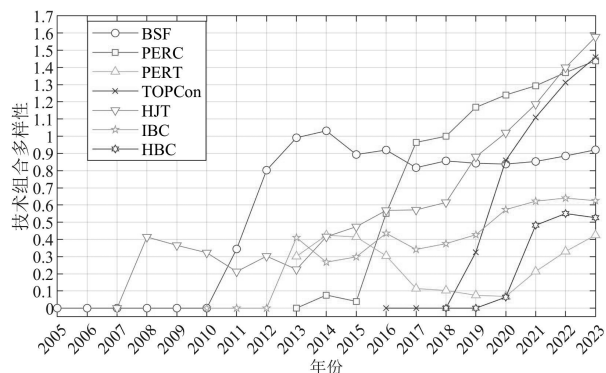


图 3 7 种晶硅太阳能电池技术组合多样性

从总体变化趋势来看,不同技术路线的技术组合多样性均呈现由低水平逐步提升的发展态势,但不同技术路线之间的增长速度和最终水平存在明显差异。这表明,各技术路线在演化过程中形成了不同的内部技术结构特征,其技术要素组合方式、技术积累路径和技术发展阶段具有较强异质性。

作为较早实现规模化应用的技术路线,BSF 电池的技术组合多样性自 2005 年开始持续提升,并于 2013—2014 年达到相对较高水平。此后,其技术组合多样性整体保持平稳,并呈现小幅波动特征。这一变化表明,BSF 技术路线在早期发展阶段经历了较为充分的技术组合扩展,而后逐步进入

相对成熟的发展阶段,路径内部技术结构趋于稳定。PERC 电池自 2015 年前后进入快速发展阶段后,技术组合多样性持续提升,并逐渐超过 BSF 技术路线。至 2023 年,其技术组合多样性已接近 1.4。在此过程中,PERC 技术逐步成为晶硅太阳能电池产业的重要主流技术路线。技术组合多样性的持续增长表明,该技术路线在演化过程中不断吸收和整合新的技术要素,路径内部技术结构持续丰富,技术组合形式不断扩展。相比之下,PERT 电池的技术组合多样性整体处于较低水平,增长速度相对缓慢,反映出其路径内部技术组合结构扩展程度相对有限。

新一代 N 型技术路线表现出更为明显的增长趋势。其中,TOPCon 技术组合多样性自 2018 年后快速提升,并于 2023 年达到 1.5 左右;HJT 技术组合多样性自 2018 年后显著上升,并于 2023 年达到 1.6 左右。两类技术路线均表现出较强的技术组合扩展特征,说明其路径内部涉及的技术要素种类不断增加,技术结构复杂性持续提高。与此同时,IBC 和 HBC 技术路线的技术组合多样性也呈现持续增长态势,但整体水平低于 TOPCon 和 HJT,表明其技术结构扩展程度相对较弱。

进一步比较不同技术路线可以发现,早期主流技术路线与新一代高效技术路线之间的技术组合多样性差异逐渐扩大。特别是在 2018 年以后,TOPCon、HJT 等新技术路线的技术组合多样性增长速度明显快于 BSF 和 PERT 等技术路线,反映出不同技术路径在技术演化过程中形成了差异化的内部技术结构特征。同时,多条技术路线的技术组合多样性同步提升,也表明晶硅太阳能电池产业内部技术结构呈现持续丰富化的发展趋势。

(四)行业溢出多样性演化分析

表 3 给出了晶硅太阳能电池产业后向引用专利所对应的国民经济行业分类(CNEIC)频率统计结果。共识别有效后向引用关系 13 421 项,对应行业代码 73 844 个。从行业分布来看,被引用专利主要集中于仪器仪表制造业(C40)、非金属矿物制品业(C30)、电气机械和器材制造业(C38)、专用设备制造业(C35)、通用设备制造业(C34)以及

计算机、通信和其他电子设备制造业 (C39) 等领域。这表明,晶硅太阳能电池产业在技术演化过程中,与装备制造、材料制造及电子信息等相关行业保持较强的技术关联。

表 3 晶硅太阳能电池后引专利 CNEIC 频率

CNEIC	行业 (GB/T4754—2017)	频率/次
C40	仪器仪表制造业	12 872
C30	非金属矿物制品业	12 367
C38	电气机械和器材制造业	12 145
C35	专用设备制造业	11 459
C34	通用设备制造业	11 264
C39	计算机、通信和其他电子设备制造业	10 840
C43	金属制品、机械和设备修理业	1 040
C26	化学原料和化学制品制造业	584
O81	机动车、电子产品和日用产品修理业	335
C33	金属制品业	275
D44	电力、热力生产和供应业	142
E48	土木工程建筑业	114
C29	橡胶和塑料制品业	60
C42	废弃资源综合利用业	54
C32	有色金属冶炼和压延加工业	44
其他	其他行业	248

根据行业溢出多样性测度方法,本文测算了 2005—2023 年晶硅太阳能电池产业的行业溢出多样性水平,结果如图 4 所示。

从总体变化趋势来看,行业溢出多样性呈现持续增长态势,但不同阶段的增长速度存在明显差异。其中,2005—2010 年,行业溢出多样性由接近 0 逐步上升至 0.8,整体处于较低水平。这一时期中国晶硅太阳能电池产业尚处于发展初期,产业规模相对有限,与外部行业形成的技术关联结构相对简单,后向引用专利所涉及的行业范围也相对集中。

2010—2019 年,行业溢出多样性进入快速增长阶段,由约 0.8 提升至 2.6 左右。与前一阶段相

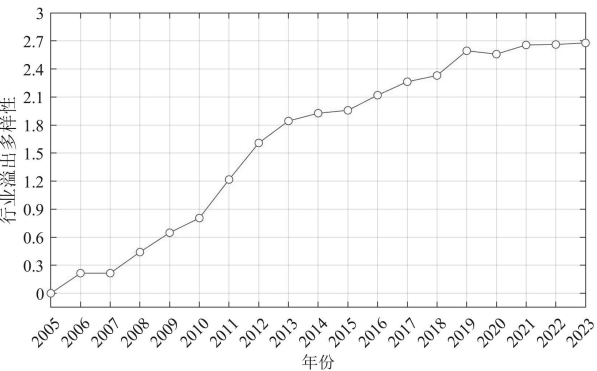


图 4 晶硅太阳能电池行业溢出多样性

比,后向引用专利涉及的行业类别显著增加,行业关联结构不断扩展,行业来源分布也更加多元化。特别是在仪器仪表、装备制造、电子信息及材料制造等领域,相关行业在后向引用网络中的出现频率持续提高,表明晶硅太阳能电池产业与外部行业之间形成了更加广泛的技术关联结构。与此同时,PERC、HJT 等新技术路线逐步发展,产业技术体系呈现出更加复杂的结构特征,行业溢出多样性的快速增长与这一阶段产业技术扩展特征表现出较强一致性。

2019 年以后,行业溢出多样性继续保持增长,但增速明显放缓,由 2.6 左右缓慢上升至 2.7 左右,整体进入相对稳定阶段。从行业构成来看,后向引用专利所涉及的行业范围仍在扩展,但增长幅度明显低于前期阶段。这表明,晶硅太阳能电池产业与外部行业之间的技术关联结构逐步趋于成熟,新增行业来源数量增长放缓,行业关联重点更多集中于既有核心领域。与此同时, TOPCon、HJT 等新一代技术路线进入产业化发展阶段,行业溢出多样性总体保持高位运行,反映出产业技术体系始终保持较广的跨行业技术关联范围。

(五) 产业技术多样性演化分析

根据产业技术多样性测度方法,本文测算了 2005—2023 年中国晶硅太阳能电池产业的产业技术多样性水平,结果如图 5 所示。

从总体变化趋势来看,产业技术多样性指数由 2005 年的接近 0 逐步提升至 2023 年的 4.1,整体呈现持续上升态势,但不同阶段的增长速度存在明显差异。

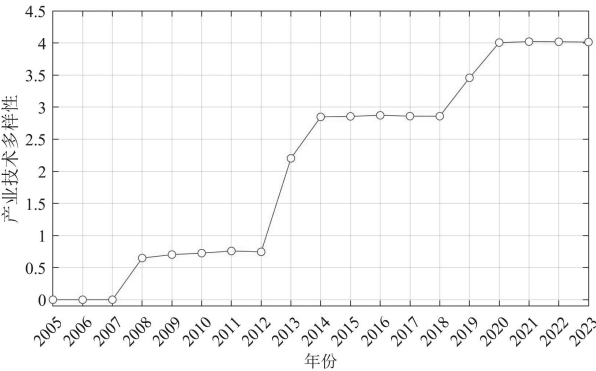


图 5 晶硅太阳能电池产业技术多样性

2005—2007 年间,产业技术多样性整体处于较低水平,指数几乎平稳。该阶段产业技术体系以 BSF 技术路线为主,其他技术路线尚处于技术起步阶段,产业内部技术路径分布较为集中,技术结构相对单一。2009—2012 年间,产业技术多样性进入缓慢发展阶段,由 0.6 上升至 0.7 左右。该阶段 PERC 等新技术路线逐步进入发展过程,多条技术路径开始并行出现,产业内部技术结构由单一路径主导逐步转向多路径并存,路径分布的均衡性有所提升。2013—2023 年间,产业技术多样性持续上升并维持在较高水平,由 2.2 提升至 4.1。在这期间, TOPCon、HJT、IBC 及 HBC 等新一代技术路线逐步发展,产业内部形成多技术路径长期并存的结构形态,不同技术路径在综合能力表现上的差异更加明显,产业技术结构呈现出更为复杂的分布特征。

进一步结合技术组合多样性与行业溢出多样性的变化趋势可以发现,3 类多样性指标在样本期内均呈现整体上升趋势,其中技术组合多样性由低水平逐步提升至约 1.5,行业溢出多样性由接近 0 上升至 2.7,产业技术多样性则同步提升至 4.1。3 类指标在时间变化趋势上表现出一定程度的一致性,反映出产业技术结构在路径内部重组与跨行业技术扩展共同作用下呈现持续丰富化的发展特征。总体而言,产业技术多样性指数变化反映了晶硅太阳能电池产业由早期单一路径集中状态逐步演化为多技术路径并存的结构变化过程,体现了产业内部技术路径分布结构由集中向分散的动态调整特征。

(六)有效性分析

本文构建的多层次新兴产业技术多样性测度方法,旨在更全面、动态地刻画产业技术进步。为验证该方法的有效性,本文将其与传统以专利数量为代表的产业技术进步测度指标进行比较分析^[41]。尽管专利数量能够反映创新活动的总体规模,但其难以刻画技术结构中多路径并行演化与组合调整等深层次特征。为此,本文基于 2005—2023 年中国晶硅太阳能电池产业授权专利数据,对技术多样性指标与专利数量在反映产业技术演化过

程中的表现进行对比。

根据图 6 所示趋势可以发现,技术多样性与专利数量在整体变化方向上具有一定一致性,但在阶段性波动与结构变化上呈现出差异化特征。第一,在 2005—2009 年的产业周期波动阶段,技术多样性与专利数量的变化幅度存在明显差异。2008 年全球金融危机及 2011—2013 年欧美“双反”冲击使光伏产业进入调整阶段,专利数量整体增长较为平缓,而技术多样性则由 0.65 快速上升至约 2.21,表现出更为显著的结构性变化特征。与此同时,光电转换效率由约 15.5% 逐步提升至 17.0% 以上,组件成本由约 3.2 USD/W 持续下降至约 1.0 USD/W 以下,表明产业性能改善在该阶段已率先发生,而技术多样性在方向上与这一结构性改善过程保持更高一致性,相较之下专利数量未能同步刻画该变化。第二,在 2010—2015 年的产业结构调整阶段,两类指标呈现不同演化特征。技术多样性由约 0.73 上升至约 2.86,而专利数量虽由约 0.68 百件增长至约 5.78 百件,呈现出规模增长相对平缓而结构变化更为显著的特征。这一差异表明,在龙头企业更替与技术路线逐步分化过程中,专利数量主要反映研发活动规模扩展,而技术多样性更能够刻画技术路径组合结构的扩展与重构过程,同时与光电转换效率持续提升及成本快速下降过程表现出一致性变化趋势。第三,在 2016 年前后的产能调整与技术转型阶段,产业面临阶段性产能过剩压力,技术多样性增速有所放缓,整体在约 2.86 附近小幅波动,而专利数量仍保持持续增长。该阶段技术路径由 PERC 逐步向 TOPCon、HJT 等方向演进

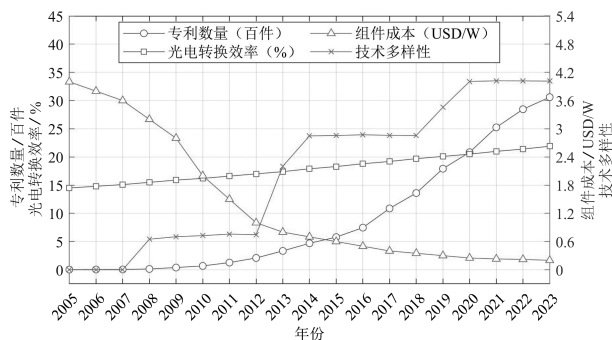


图6 晶硅太阳能电池产业专利数量、光电转换效率、光伏组件成本和技术多样性

过程中,专利数量更多体现研发活动规模的持续扩张,而技术多样性则更集中反映技术路线在扩展过程中的结构分化与再组合特征,并与光电转换效率持续提升及组件成本下降的改善趋势保持一致。第四,在 2019 年以后的多技术路径扩展阶段,PERC 技术成熟, TOPCon、HJT 等新技术路线高速发展,技术多样性由约 3.46 持续提升至约 4.1,而专利数量由约 17.92 百件增长至约 30.60 百件,呈持续扩展态势。同时,光电转换效率由约 19.2% 提升至 21.9%,组件成本由约 0.4 USD/W 下降至约 0.2 USD/W。在此过程中,相较于专利数量主要反映创新活动规模的增长,技术多样性与效率提升及成本下降表现出更高一致性,更敏锐地刻画了多技术路线并行发展所带来的结构性变化。

为进一步从统计意义上检验上述趋势一致性关系的稳健性,本文在描述性分析基础上引入去趋势相关、一阶差分相关及滞后相关等方法进行补充检验。首先,在去趋势处理方面,本文对各变量进行线性时间趋势剔除后重新计算相关系数。结果显示,技术多样性与光电转换效率之间的相关系数为 0.044,与组件成本之间的相关系数为 -0.106;相比之下,专利数量对应结果分别为 0.856 与 0.934。可以发现,在剔除共同时间趋势影响后,技术多样性与产业技术进步之间的相关性显著下降,而专利数量仍保持较高的趋势一致性,表明专利指标更易受到长期时间趋势驱动,而技术多样性更体现结构性特征。

其次,在一阶差分检验中,本文进一步考察各变量年度变化之间的短期响应关系。结果显示,技术多样性变化量与光电转换效率变化量及组件成本变化量之间的相关系数分别为 0.044 与 0.082,而专利数量对应结果分别为 0.506 与 0.669。整体来看,技术多样性几乎没有表现出显著的年度波动相关性,而专利指标仍呈现相对更强的短期波动关联特征。

再次,在滞后一期检验中,本文考察技术多样

性对后续产业技术水平变化的时间对应关系。结果显示,技术多样性滞后一期与光电转换效率之间的相关系数为 0.969,与组件成本之间的相关系数为 -0.856;而专利数量对应结果分别为 0.928 与 -0.662。可以发现,技术多样性在滞后维度上仍保持较高且稳定的相关性,并且在解释效率提升方面高于专利指标,进一步表明其对产业技术进步具有更强的时间前导性特征。

表 4 报告了技术多样性测度有效性的趋势检验结果。综合不同数据处理方法可以发现,在原始相关、去趋势相关及滞后相关等多种检验框架下,技术多样性指标与光电转换效率提升及组件成本下降之间整体仍保持结构一致性关系,但在去趋势与差分层面相关性显著减弱,而在滞后维度保持较高稳定性。这一结果共同表明,技术多样性主要刻画的是产业技术体系的长期结构性演化特征,而非短期波动特征。

表 4 技术多样性测度有效性的趋势检验

检验方式	TD_t - 效率	专利 - 效率	TD_t - 成本	专利 - 成本
原始相关	0.967	0.940	-0.896	-0.702
去趋势相关	0.044	0.856	-0.106	0.934
一阶差分相关	0.044	0.506	0.082	0.669
滞后 1 期相关	0.969	0.928	-0.856	-0.662

综合上述多维度稳健性检验结果可以发现,技术多样性指标在解释产业效率提升与成本下降方面表现出较强的结构一致性与时间稳定性,能够稳定刻画产业技术进步过程。相较于传统专利数量指标,技术多样性能够更为细致地反映产业技术演化过程中的结构调整与路径变化特征。

(七) 稳健性分析

为进一步验证本文多层次技术多样性测度结果的稳健性,本文从技术分类层级、测度方法替代、专利样本口径、引用窗口设定以及行业距离参数设定等方面进行系统检验,相关结果见表 5。

(1) 在技术分类层级方面,本文将 IPC 大组(6 位代码)替换为 IPC 小类(4 位代码)重新测度技术组合多样性及产业技术多样性,结果显示各指标的时间演化趋势与基准结果保持一致,表明测度结果不受技术分类粒度影响。

(2)在测度方法方面,采用 Shannon 指数替代 Rao-Stirling 指数重新计算各类多样性指标,结果显示演化趋势与基准测度基本一致,说明结论不依赖于特定指标函数形式。

(3)在专利样本口径方面,以发明专利替代全部授权专利重新进行测算,结果表明三类多样性指标的动态变化特征未发生显著变化,研究结论具有较强稳健性。

(4)在引用窗口方面,将全样本引用窗口调整为 5 年窗口重新测度行业溢出多样性及产业技术多样性,结果显示指标变化趋势保持稳定,说明结论不受引用滞后设定影响。

(5)在行业距离设定方面,将距离权重由“门类=1、大类=0.5、同类=0”调整为“门类=1、大类=0.6、同类=0”,重新估计结果仍保持一致,表明结论对参数设定不敏感。

表 5 多层次技术多样性测度稳健性检验结果

稳健性 检验类型	替代方案	涉及指标	检验结果
IPC 层级替代	IPC 大类→IPC 小类	TD_p, TD_i	多样性指标演化趋势与基准测度保持一致
多样性指数替代	Rao-Stirling 指数→Shannon 指数	TD_p, TD_i	多样性指标演化趋势与基准测度保持一致
专利口径替代	全部授权专利→发明专利	TD_p, TD_s, TD_i	多样性指标演化趋势与基准测度保持一致
引用窗口替代	全样本引用→5 年引用窗口	TD_s, TD_i	多样性指标演化趋势与基准测度保持一致
行业距离权重替代	门类=1、大类=0.5、同类=0→门类=1、大类=0.6、同类=0	TD_s, TD_i	多样性指标演化趋势与基准测度保持一致

综合上述检验可以发现,无论在分类层级、测度方法、样本口径、时间窗口还是距离参数方面进行调整,3 类技术多样性指标的演化特征均保持高度一致,说明本文多层次技术多样性测度体系具有较强稳健性,核心结论具有可靠性与解释力。

四、结论与对策建议

(一)研究结论

第一,在新兴产业技术多样性的概念界定方面,新兴产业技术多样性本质上是一种由多层次结构嵌套所构成的动态演化体系,其内在结构由内部聚合层、技术扩展层与产业结构层共同构成,

并呈现出由技术要素重组向跨域扩展再到路径结构重构的递进式演化逻辑。这一结构性特征表明,技术多样性并非技术分布状态的静态刻画,而是不同层次技术生成机制及其相互作用关系的呈现,从而拓展了传统以技术分布为核心的多样性概念框架。

第二,在新兴产业技术多样性的作用机制方面,新兴产业技术进步可以被理解为一个由技术组合深化、行业溢出扩展与路径竞争演化共同驱动的多层次过程,其内在机制通过“技术组合—行业溢出—产业演化”结构得以刻画。在该框架下,技术组合多样性体现路径内部技术重组机制,行业溢出多样性体现跨行业技术扩散机制,而产业技术多样性则体现多技术路径之间的结构性竞争与并行演化关系,三者共同构成技术进步从微观积累到宏观结构演化的统一分析逻辑。

第三,在新兴产业技术多样性的测度方法方面,多层次技术多样性指标体系本质上对应于产业技术结构的可度量表达,其核心价值不在于对技术活动的简单统计,而在于对技术结构生成过程的分解与刻画。在专利数据支持下,该测度体系能够在不同技术层级之间建立一致性映射关系,从而将技术路径内部演化、跨行业扩展与整体结构变迁纳入同一分析体系,实现对新兴产业技术进步动态结构的完整、系统化刻画。

(二)对策建议

第一,强化企业内部研发组合管理,持续提升技术组合多样性。企业应避免将研发资源过度集中于单一技术模块,而应围绕核心技术路径构建多元化研发组合,通过材料、工艺、装备及系统集成等关键环节的协同创新,不断拓展路径内部的技术组合空间。同时,应建立跨部门研发协作机制和技术共享平台,促进不同技术要素之间的重组与融合,提高技术体系内部的创新效率与技术迭代能力,从而实现技术性能持续提升和成本持续下降。

第二,完善跨行业协同创新体系,提升行业溢

出多样性水平。政府应积极推动产业链上下游以及相关产业之间的协同创新,鼓励企业、高校和科研机构开展跨行业联合研发,促进知识、人才和技术要素在不同产业之间流动与共享。同时,应重点培育具有较强产业关联性的创新集群和区域创新生态系统,增强区域对外部技术的吸收、整合与再创新能力,充分发挥跨行业技术溢出对产业技术进步的促进作用^[42]。

第三,坚持多技术路线并行发展,提升产业技术多样性。PERC、TOPCon、HJT、IBC 等多种技术路线的并行竞争推动了中国光伏产业持续突破技术边界并保持全球领先地位。因此,政府在制定产业政策时,应避免过早将资源过度集中于单一技术路线,而应着力构建多元平衡的政策环境支持多种技术方案协同探索,为前沿颠覆性技术突破预留充分探索空间。在此基础上,政策工具应加快从产能扩张型生产补贴,转向研发资助、创新基金、关键技术攻关等创新导向型支持,鼓励企业开展前沿技术布局与多路径创新,推动产业在市场竞争与技术筛选机制下实现持续迭代,形成长期稳定的高质量发展格局^[43]。

参考文献:

- [1] 武建龙,鲍萌萌,杨仲基. 新兴产业颠覆性创新政策组合作用机制研究:基于创新生态系统视角[J]. 中国软科学,2023(7):44-55.
- [2] 王义中,林誉,林溪. 大国科技竞争的潜在影响与政策应对:基于技术管制视角[J]. 数量经济技术经济研究,2026,43(1):108-135.
- [3] 陈劲. 新兴技术与产业创新研究的有益探索[J]. 中国软科学,2020(6):192.
- [4] PARK H, JEONG D, LEE J D. Evolutionary mechanism for diversity dynamics in technology using a phylogenetic tree approach: directional suggestions for photovoltaic technology[J]. Industrial and corporate change, 2025, 34(1):53-78.
- [5] QUINTANA-GARCÍA C, BENAVIDES-VELASCO C A. Innovative competence, exploration and exploitation: the influence of technological diversification[J]. Research policy, 2008, 37(3):492-507.
- [6] 冉征,郑江淮. 技术范式下的创新发展:技术多样化与技术专业化的经济增长效应研究[J]. 管理世界,2024,40(9):1-20,59,21-24.
- [7] 丁焰,苗仲桢,季桓永,等. 企业技术多样性、实质性社会责任信息披露与创新扩散[J]. 科技进步与对策,2022,39(5):127-135.
- [8] 彭凯,孙海法. 知识多样性、知识分享和整合及研发创新的相互关系:基于知识 IPO 的 R&D 团队创新过程分析[J]. 软科学,2012,26(9):15-19.
- [9] GRANSTRAN D O, BOHLIN E, OSKARSSON C, et al. External technology acquisition in large multi-technology corporations[J]. R&D management, 1992, 22(2):111-134.
- [10] LEYDESDORFF L, ALKEMADE F, HEIMERIKS G, et al. Patents as instruments for exploring innovation dynamics: geographic and technological perspectives on “photovoltaic cells”[J]. Scientometrics, 2015, 102(1):629-651.
- [11] RAO C R. Diversity and dissimilarity coefficients: a unified approach[J]. Theoretical population biology, 1982, 21(1):24-43.
- [12] NELSON R R. The economics of invention: a survey of the literature[J]. The journal of business, 1959, 32(2):101-127.
- [13] KODAMA F. Technological diversification of Japanese industry[J]. Science, 1986, 233(4761):291-296.
- [14] 毕静煜,谢恩,魏海笑. 联盟伙伴技术多样性对企业突破性创新的影响:研发联盟组合特征的调节作用[J]. 研究与发展管理,2021,33(2):41-52.
- [15] 王问芳,陈健生. 异地投资提升了区域创新能力吗:基于知识技术多样化的新视角[J]. 技术经济,2025,44(7):16-28.
- [16] 王耀德,林良. 协同创新网络成员多样性如何影响企业探索式创新:技术多元化的中介效应[J]. 科技进步与对策,2021,38(22):76-82.
- [17] 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.
- [18] 何郁冰,陈劲. 技术多元化研究现状探析与整合框架构建[J]. 外国经济与管理,2012,34(1):46-56.
- [19] CHATZISTAMOULOU N, KOUNETAS K, TSEKOURAS K. Technological hierarchies and learning: spillovers, complexity, relatedness, and the moderating role of absorptive capacity[J]. Technological forecasting and social change, 2022, 183:121925.
- [20] TSEKOURAS K, CHATZISTAMOULOU N, KOUNETAS K,

- etal. Spillovers, path dependence and the productive performance of European transportation sectors in the presence of technology heterogeneity [J]. *Technological forecasting and social change*, 2016, 102: 261-274.
- [21] 孙雅慧, 时省, 彭飞, 等. 研发补贴与渐进式创新锁定: 基于机器学习的专利文本分析[J]. *经济研究*, 2024, 59(11): 89-105.
- [22] MARIOTTI F, HAIDER S. Managing institutional diversity and structural holes: network configurations for recombinant innovation [J]. *Technological forecasting and social change*, 2020, 160: 120237.
- [23] GUAN J C, YAN Y. Technological proximity and recombinative innovation in the alternative energy field [J]. *Research policy*, 2016, 45(7): 1460-1473.
- [24] 傅元海, 叶祥松, 王展祥. 制造业结构优化的技术进步路径选择: 基于动态面板的经验分析[J]. *中国工业经济*, 2014(9): 78-90.
- [25] VERSPAGEN B. Estimating international technology spillovers using technology flow matrices [J]. *Review of world economics*, 1997, 133(2): 226-248.
- [26] 叶阳平, 马文聪, 吴小节, 等. 人工智能与产业技术融合对制造业企业产品创新绩效的影响研究[J]. *中国工业经济*, 2025(11): 150-168.
- [27] 周璇, 陶长琪. 水平式知识溢出、技术嵌入式创新与产业结构协调化: 以我国制造业为例[J]. *科研管理*, 2021, 42(7): 126-136.
- [28] 刘峰, 宋艳, 黄梦璇, 等. 新兴技术生命周期中的“峡谷”跨越: 3G 技术的市场发展研究[J]. *科学学研究*, 2011, 29(1): 64-71.
- [29] ADNER R, KAPOOR R. Innovation ecosystems and the pace of substitution: re-examining technology S-curves [J]. *Strategic management journal*, 2016, 37(4): 625-648.
- [30] SONG Y, GNYAWALI D, QIAN L. From early curiosity to space wide web: the emergence of the small satellite innovation ecosystem [J]. *Research policy*, 2024, 53(2): 104932.
- [31] 寿柯炎, 魏江, 刘洋. 后发企业联盟组合多样性架构: 定性比较分析[J]. *科学学研究*, 2018, 36(7): 1254-1263.
- [32] 杨武, 陈培, Gad D. 专利引证视角下技术轨道演化与技术锁定识别: 以光刻技术为例[J]. *科学学研究*, 2022, 40(2): 209-219.
- [33] 夏舒娴, 段异兵. 中国技术多样性演进和热点领域分析: 基于 2000—2021 年 USPTO 授权发明专利数据[J]. *科技和产业*, 2022, 22(10): 201-206.
- [34] 杨杰, 柳美君, 步一, 等. 组合新颖性和学科新颖性能否提升论文的技术影响: 基于直接和间接技术影响力的双重视角[J]. *情报学报*, 2025, 44(3): 325-338.
- [35] 陈培祯, 曾德明, 李健. 技术多元化对企业新产品开发绩效的影响[J]. *科学学研究*, 2018, 36(6): 1070-1077.
- [36] TRAJTENBERG M, HENDERSON R, JAFFE A. University versus corporate patents: a window on the basicness of invention [J]. *Economics of innovation and new technology*, 1997, 5(1): 19-50.
- [37] STEPHAN A, BENING C R, SCHMIDT T S, et al. The role of inter-sectoral knowledge spillovers in technological innovations: the case of lithium-ion batteries [J]. *Technological forecasting and social change*, 2019, 148: 119718.
- [38] 袁潮清, 董鸿源. 光伏组件技术进步的“干中学”与“研中学”效应研究[J]. *中国软科学*, 2024(7): 49-58.
- [39] 李光泗, 沈坤荣. 技术进步路径演变与技术创新动力机制研究[J]. *产业经济研究*, 2011(6): 71-78.
- [40] 王委委, 张群. 我国 N 型晶硅太阳能电池专利现状及发展对策研究[J]. *中国发明与专利*, 2022, 19(11): 12-20.
- [41] 王崇锋, 王世杰. 知识多样性和合作网络中心性对企业双元创新的影响: 以 5G 移动通信产业为例[J]. *科学与管理*, 2021, 41(6): 12-20.
- [42] 董鸿源, 袁潮清. 产业政策对光伏企业创新绩效的影响研究: 基于区域创新体系的调节作用[J]. *技术经济*, 2023, 42(6): 36-46.
- [43] 孙正昕, 郁俊莉. 地方产业政策、研发补贴与企业创新: 基于战略性新兴产业的实证[J]. *统计与决策*, 2023, 39(1): 173-177.