

根技术的概念主题、结构内涵及对供应链韧性影响

张阅肆^{1,2}, 房汉廷^{3,4}

(1. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

3. 浙江大学国家战略与区域发展研究院, 浙江 杭州 310058;

4. 浙江大学杭州国际科创中心新质生产力与创新战略研究院, 浙江 杭州 311200)

摘要:根技术(root technology, RT)对于实现关键核心技术自主可控和提升产业链供应链安全水平具有重要战略意义。已有研究主要基于理论推演和案例分析,提出关于根技术的核心维度结构的猜想,但尚未进行严格的实证量化验证,制约了后续的深化研究。为弥补这一缺口,基于三阶段的方法论设计对根技术的维度结构进行量化检验与分析。首先,基于学术论文、专利文献、基金项目、政策文本、投融资事件、网络社区文本等多源数据,采用主题建模方法,识别和验证原创性、基础性、难以替代性、分化扩散性、多向赋能性五大核心维度,并揭示科学家、企业家、投资家、政治家与公众等不同主体在根技术生命周期各阶段的异质化认知。其次,结合访谈法和扎根理论方法,深化对根技术5个维度的内涵解释。最后,研究通过问卷调查开发根技术概念的测度模型,并进行严格的信效度检验,证实测度模型的可靠性与有效性,并基于该测度模型,验证根技术对供应链韧性的正向影响。研究结果为根技术的操作化定义、精准识别和实证研究提供了工具和方法。

关键词:根技术;根技术创新;科技博弈;高水平科技自立自强;科技强国

中图分类号:F062.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2025)09-0025-17

Conceptual themes, structural connotations, and impacts on supply chain resilience of root technology

ZHANG Hongsi^{1,2}, FANG Hanting^{3,4}

(1. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Institute of National Strategy and Regional Development, Zhejiang University (ZJU), Hangzhou 310058, China;

4. Institute of New Quality Productivity and Innovation Strategy,

ZJU-Hangzhou Global Science and Technology Innovation Center, Hangzhou 311200, China)

Abstract: Root technology (RT) holds significant strategic importance for achieving independent control over key core technologies and enhancing the security of industrial and supply chains. Existing research primarily relies on theoretical deduction and case analysis to propose hypotheses regarding the core dimensional structure of root technology, but lacks rigorous empirical quantitative verification, which hinders further in-depth studies. To address this gap, this study employs

收稿日期:2025-07-05 修回日期:2025-08-20

基金项目:浙江省新型智库重点课题项目“关于发现和培育根技术、根产业的建议”(24ZK008Z);北京大成企业研究院重点课题项目“我国根技术与根产业创新战略研究”(2025DC003A);中国博士后科学基金面上资助项目“依托重大工程发现和培养战略科学家的共同体模式”(2024M763080)。

作者简介:张阅肆(1994—),男,安徽合肥人,中国工程院与清华大学联合博士后,博士,研究方向为科技政策与创新管理。通信作者:房汉廷。

a three-stage methodological design to quantitatively examine and validate the dimensional structure of root technology. First, based on multi-source data including academic papers, patent documents, funded projects, policy texts, investment and financing events, and online community texts, topic modeling methods are used to analyze and identify five core dimensions: originality, fundamentality, irreplaceability, differentiation and diffusion, and multi-directional empowerment. This also reveals the heterogeneous perceptions of different actors—such as scientists, entrepreneurs, investors, politicians, and the public—across various stages of the root technology lifecycle. Subsequently, through interviews and grounded theory methods, the connotative structures and theoretical explanatory power of these five dimensions are deepened and validated. Finally, a measurement model for root technology is developed via questionnaire surveys, with rigorous reliability and validity tests confirming the model's reliability and effectiveness. Based on this model, the positive impact of root technology on supply chain resilience is verified. This study provides effective tools and methodological support for the operational definition, precise identification, and empirical research of root technology.

Key words: root technology; root technology innovation; tech rivalry; high-level self-reliance and self-strengthening in science and technology; science and technology powerhouse

在大国博弈与科技革命、产业变革加速演进的时代背景下,根技术(root technology, RT)不仅是突破全球价值链“低端锁定”的关键技术,也是实现高水平科技自立自强的重要技术基础。加快建设科技强国,需要进一步夯实科技创新的根基和支撑。根技术(RT)作为创造技术体系的技术^[1],在创新经济、创新管理、技术经济与管理等领域逐渐受到关注,但仍处于初步探索阶段。目前,现有文献多聚焦于根技术的概念界定与案例分析,其中一些研究将根技术置于关键核心技术或通用技术的范畴之下进行审视,重点讨论专利网络和技术谱系的构建^[2];还有研究则强调根技术在技术体系中的“基因”作用,主张以新范式定义其原创性、基础性和难以替代性等特征^[1]。学者围绕根技术的生命周期与演化路径展开了多角度讨论,但关于根技术的主题范围、概念内涵和维度结构,尚未达成共识^[1-5]。作为一种新兴范式,根技术目前仍缺乏足够的经验证据支持,尤其是在可靠的测度体系和实证研究方面。目前的研究多以定性分析或二手数据为主,迄今未见将根技术概念转化为可量化的指标体系,并通过信效度验证。由此带来了“识根”“评根”能力的缺口,导致政策界和产业部门在科技评估和资源配置时,难以从根技术的角度展开有效的工作。此外,现有研究还通过理论演绎和案例归纳,对根技术的作用影响作出论断,提出根技术对创新链、价值链和产业链分别具有掌控、支配和创造之力^[1],进而

保障现代化产业链的健康稳定运行^[2]。但受限于根技术测度工具的缺位,上述命题未能得到实证检验。现实层面,一些国家凭借对大量根技术的掌控形成“根霸权”,对后发国家实施技术断供与标准割据,加剧了后发国家的产业链供应链风险。围绕根技术的关键特征维度,实证分析其对供应链韧性的影响,有助于细化供应链韧性形成和提升的机制,并深化对根技术作用影响的机理认识。

为此,已有研究提出根技术具有五维结构的猜想^[1],为识别根技术提供了初步的观测框架,但该猜想尚未经过量化数据分析和实证检验。基于此,本文拟采用三阶段的方法论对根技术的维度结构进行测度。具体步骤如下:①在系统回顾根技术(RT)概念和内涵的文献基础上,通过收集学术论文、专利文献、基金项目、政策文本、投融资事件及网络社区文本等多源数据,运用主题建模方法识别并初步验证根技术的核心维度结构;②结合专家访谈和扎根理论方法,对主题建模结果所识别的核心维度进行进一步理论化,明确各维度的内涵及结构关系;③通过问卷调查法开发根技术的测量工具,并采用探索性与验证性因子分析及严格的信效度检验,构建可靠的根技术测量模型,进一步实证验证根技术各维度对供应链韧性的影响,检验测量模型的效标效度。

一、文献述评与概念主题分析

(一)文献回顾与述评

随着大国科技博弈的升级,根技术已由政策

倡议上升为技术经济学与创新管理的前沿议题。以美国对我国的“断根”行动为典型外部压力^[3],国内对规模化“筑根”的紧迫需求进一步被激发。在概念与理论框架上,房汉廷^[1]认为国家间竞争的深层本质是根技术与根产业之争,并提出“得根技术者得根产业”的战略逻辑^[1,3-4];将根技术界定为技术体系的“基因源代码”,提出“向下筑根—向上涌现—临界爆发—全面泛化”的四阶段过程与“弱根—中根—强根”三分型框架,为后续经验研究奠定了概念基础^[1,3]。魏际刚^[5]以人工智能芯片和开发框架为例,揭示根技术作为技术树之“根”在生态构建与竞争优势中的决定性作用。在概念深化过程中,研究者逐步厘清了根技术与关键核心技术的差异:与关键核心技术相比,根技术更强调对整个技术簇的底层支撑与可持续演进,二者虽相互嵌套,但侧重点不同^[2]。以芯片光刻为例,投影式曝光、直写式光刻、光刻胶材料与光掩膜制造共同构成“根—干—叶”交织的技术簇,决定了后续制程精度、产能与成本的极限。在工业互联网底层控制、边缘计算乃至自主芯片等领域,根技术突破将带来价值链攀升效应^[6]。定位为电子信息产业“筑根”平台的实验室,通过将基础研究、应用研究与产业化“同址孵化”,促进了创新链协同^[7]。数据基础设施^[8]与基础软件^[9]亦在数字经济进程中展现出“根”属性的若干特征。

在量化研究方面,国内学者多基于专利文本挖掘与专利网络分析识别根技术及其演化,但整体上依赖二手客观数据,缺乏对根技术的直接测量^[2]。国外学者亦提出了若干相近路径: Tierney等^[10]在制药业构建“技术景观”路线图模型,并结合技术成熟度评估方法,刻画具有“根”特性的技术在理论基础性与商业化驱动两个维度上的特征; Bae等^[11]在韩国“制造业根技术”数字化项目中,将知识表达为“零件—工艺—过程”三层本体,基于语义推理记录知识复用频次与跨层调用路径,以映射根技术的集成性与可继承性; Han等^[12]则运用结构主题模型与竞争矩阵,对近两万篇国际论文进行文本挖掘,利用主题出现概率、增速与差距等客观指标,提出“主导—追赶”四象限模型,

用以衡量根技术的国际竞争位势与新兴度。总体来看,现有量化研究虽在专利文本分析、技术网络评估、路线图与本体建模方面取得进展,但仍存在两方面不足:其一,尽管已有研究指出根技术具有基础性、复杂性、集成性与高壁垒性等维度特征^[2],相关量化分析未能充分反映这些维度,亦未直接测量科技企业或研发主体对该等维度的感知认知;其二,现有测度方法主要依赖专利文本、网络指标等二手数据,指标分散且可比性不足,尚未将其转化为经信效度检验的主客观量表,测度工具的缺失已成为根技术理论深化与实证研究的瓶颈。

在地缘风险、供应链联盟排挤、非关税壁垒等多重外部挑战下,我国应加快对关键技术(例如根技术)的突破和自主可控,为供应链抗冲击能力提供科技支撑^[13-14]。供应链韧性的内涵涵盖以下4个方面:对冲击性事件的准备、响应、恢复及之后的增长/竞争优势^[15]。根技术作为创造技术体系的技术,对于提升供应链韧性的作用日益突出。例如,根技术原创能力影响供应链主体在基础科学研究、原创技术路径探索、关键原理发明等方面“从0到1”的突破。一旦遭遇外部冲击,具备根技术原创能力的主体,通过内部资源重组与替代路线自主开发,能实现对供应网络的重建与恢复。此外,根技术具有的基础性地位,使掌握根技术的企业有便利条件成为技术标准的制定者。这意味着掌握根技术及其专利,不仅有助于保证自身供应安全,还可通过标准输出、复用与辐射^[16],提升其对上下游资源配置活动的影响力,增强供应链体系的自主可控性。

综上所述,已有文献在根技术的概念界定、产业案例、特征分析与供应链安全等方面奠定了重要基础,但仍缺乏经过信效度检验的量表来统一评估其内涵、维度特征及对供应链韧性的影响。本文在系统梳理既有研究的基础上,通过主题分析与案例访谈提炼关键维度,采用探索性与验证性因子分析开发量表,检验其信效度与适用性,并进一步分析根技术各特征维度对供应链与价值链绩效的影响,从而为后续实证研究提供基础性的测度工具。

(二)概念主题识别与分析

在根技术的维度建构与量表开发之前,本文

采用动态主题建模方法,识别与根技术相关的主题及不同群体的异质性表达,旨在揭示科学家、企业家、投资家、政治家与公众等群体对根技术在不同发展阶段的认知差异。

在根技术的全生命周期中,各主体的关注点与介入方式存在差异。科学家(包括技术发明者与工程师)主要活跃于“0 到 1”的创造阶段,关注技术的原创性与突破性,并通过基础研究与原理验证判断其可行性;企业家在“1 到 10”的扩散阶段评估技术能否规模化落地并形成可控的产品与服务,重点探索从实验室样品到市场化产品的转化路径;投资家主导“10 到 100”的商业化阶段,关注技术的盈利潜力与资本回报,推动大规模应用。相较而言,政治家与公众虽非专业评判主体,难以从专业角度直接判定技术能否突破或商业化,但可分别从安全监管、合规审核与社会接受度等方面提供制度与舆论支持。

在根技术的发展过程中,公众同时扮演技术应用的承受者与治理结构中的关键行动者。随着人工智能等技术普及,“机器替人”的趋势持续深化,并呈现出从蓝领、到白领、再到精英的梯度替代;工业机器人在制造等领域替代部分蓝领劳动;人工智能算法开始渗透白领岗位;医生、律师、教授等高门槛职业在数智时代亦面临替代压力。由此引发公众对就业机会与技能升级的广泛担忧,因此在技术落地过程中,公众可能发挥干预甚至阻滞作用。当根技术推广触及既有利益格局时,社会成员往往通过集体行动维护自身利益,从而影响技术应用进程与政策导向。以 2024 年百度在武汉推出无人驾驶出租车服务“萝卜快跑”为例,部分出租车企业联合发布公开信,表达行业生存压力并抵制无人驾驶网约车,促使有关方面对落地节奏与规模进行再评估。

与此同时,公众参与技术伦理治理亦暴露出矛盾与风险:在公众监督的表象下,科学理性与公众情绪之间常处于拉锯,容易演变为非专业干预甚至民粹化倾向。以转基因食品为例,基于健康风险直觉的质疑促进了食品安全与伦理审查标准的提升,还在部分公众科学素养不足且谣言传播

迅速的情境下,可能使理性监督滑向对科学技术的舆论审判。此外,企业以专利保护与商业秘密为由的选择性披露加剧信息不对称,企业借助所谓的科普与传播活动塑造公众认知,从而弱化外部监督效果。为避免民主愿景滑向反智主义与技术民粹化:第一,要建立独立的科学仲裁与快速辟谣机制,及时澄清虚假信息;第二,要完善企业信息披露与责任追溯制度,防止技术风险外部化与转嫁;第三,要设置制度化的公众参与渠道(如听证会、参与式的技术影响评估),以程序化参与替代情绪化的“舆论审判”。

为刻画不同群体间的认知差异,本文基于学术论文、专利、基金项目、政策文本、投融资事件与网络社区文本等多源数据开展主题建模。围绕根技术的发展过程,本文建立“阶段—主体—活动—认知对象”的映射:在“0 到 1”的创造阶段,科学家的论文发表与基金项目申报主要指向原创性概念验证、原理探究与原型研发;进入“1 到 10”的扩散阶段,企业家通过组织专利申请与授权等活动,为根技术的产品化提供组织、管理与运营支持;在“10 到 100”的商业化阶段,投融资事件折射出投资者对根技术盈利前景与资本回报的集体判断。同时,政策文本作为政治家信念、价值取向与议程设置的话语载体,呈现其对根技术社会影响与发展方向的期望;网络社区(论坛、社交媒体等)讨论则反映公众对根技术风险、伦理与消费价值的认知与态度。

1. 资料收集

通过对“根技术”“根科技”“根源性技术”“元技术”“基座技术”“底座技术”“基础性平台技术”等近同义词的初步筛选,提取相关文献的题录信息(如作者/机构、发布时间、文献类别等)和正文内容,并根据主题的相关性标注主体标签,如“科学家”“企业家”“投资家”“政治家”“公众”等。具体筛选过程如下。①在 Web of Science 核心合集、中国知网、万方与 Scopus 等数据库以关键词进行主题检索,筛选“根技术”近义概念相关论文,明确技术大类;人工剔除与主题无关的生物学、农学与焊接工艺等文献(如“菌根技术”“木本植物化学控根技术”“hairy root technology”“焊缝清根技术”)。

②鉴于 IT 领域对“根技术”界定较清晰,在智慧芽、大为全球专利数据库与 IncoPat 等平台围绕服务器、国产数据库、工业操作系统与移动操作系统等进行检索,筛选与“根技术”内涵相符的专利,并按申请人类型(企业或研究机构)标注企业家或科学家主体。③基于国家自然科学基金委、科技领军企业研发项目与欧盟“地平线”等计划的项目指南、摘要与执行报告检索契合文本,并通过 CTTI 补充科技智库相关内容,检索过程中持续以 IT 领域典型“根技术”为线索。④在国务院、科技部、国家发展改革委、工业和信息化部及地方政府官网与官方新媒体检索含“根技术”近同义概念及 IT 典型“根技术”的政策文本;以湖北省为例,该省率先提出“根技术”并举办全国首届相关大赛,2022 年该省软科学项目识别出 6G 与工业软件开发等未来 5~10 年重点领域。主题建模语料同时纳入国家与地方关于战略性新兴产业与未来产业的规划文件,其中“关键核心技术”“共性技术”“工业基础”等可作为近似样本以完善政策语义场。⑤使用 IT 桔子、清科私募通、CB Insights 与 36 氦等数据库,采集与“根技术”及 IT 典型“根技术”相关的投融资事件、研报与评论。⑥收集艾瑞咨询与 199IT 等第三方产业报告,关注 IT 产业链龙头企业动向,分析企业家在“根技术”商业化中的战略与管理行为;并以澎湃新闻与百家号补充企业动态细节。⑦基于知乎、小红书与 CSDN 等社区采集讨论与专家评论,同时选取权威年度科技评论与榜单(如《麻省理工科技评论》“全球十大突破性技术”、中国工程院《全球工程前沿》与“全球十大工程成就”、中国科协重大科学问题与工程技术难题、中国科学院与中国工程院年度科技进展),并补充科技媒体与社评数据,刻画公众与媒体认知的演变。最终纳入有效资料 504 篇。

在资料收集与预处理环节中,本文对不同数据来源的信息价值进行了评估与区分。学术论文、专利文献、基金项目与政策文本作为专业性与权威性较高的来源,主要用于识别根技术的核心维度与理论内涵;投融资事件则反映市场前沿动态,具有前瞻性价值。然而,网络社区与媒体文本

较为混杂,可能包含非专业意见、传闻或主观情绪,因此本文仅审慎使用,仅将其作为补充来源。首先,本文采取质量控制措施:通过人工审核与关键词过滤,剔除明显无关、低质量或重复内容(如广告、纯宣传性帖文),并仅选取来自认证用户的社区信息,而且优先从权威媒体提取报告性内容,避免泛化社交讨论。此外,本文还明确界定网络社区与媒体文本的使用目的:①对该类数据的使用,侧重于频次信息而非内容本身,用于刻画不同主体对根技术的关注度演变;②在主题建模环节,会涉及对网络社区与媒体文本的内容分析,相关分析亦主要服务于判断公众观点与舆论氛围(如担忧就业风险或伦理争议),而非将其等同于专业性知识加以吸收整合。为此,本文采用分层抽样策略:在 BERTopic 聚类前,将此类数据占比控制在总语料字数的 15% 以内,并通过少样本提示引导 LLM 在标注时区分“专业性知识”与“公众情绪/舆论氛围”,力求增强分析的整体客观性与可靠性。

2. 主题建模分析

为提升术语一致性与跨语料可比性,本文在预处理阶段针对中英文文本分别执行分词、去停用词、词形还原(英文)与专有名词标准化,并据此构建根技术的术语词典,以对齐不同来源的表述差异。在主题建模环节,本文结合 BERTopic 与大型语言模型(LLM)以挖掘根技术的维度结构与主题内涵。采用 BERTopic 对多源文本进行结构化聚类。已有研究表明^[17],经过微调的 LLM 可在未见任务中准确预测行为,表现优于传统模型,具备抽取人类认知结构的泛化潜力。借此,LLM 可从异质语境中提取稳定、可迁移的抽象表征,为社科研究中的主题建构与维度提炼提供辅助。考虑到 BERTopic 标签的权重依赖可能导致标签冗长、专业度不足或解释性偏弱等问题,本文设计提示词调优策略(prompt tuning),将关键词与代表性文本片段输入 LLM,并结合少样本示例,引导模型生成更简洁、专业且具解释性的主题名称与摘要。该方法实现结构化聚类与语义标注的有机结合,提升主题输出的可读性与一致性。尽管上述方法在精度与稳健性方面具有优势,仍由于聚类粒度对

算法与超参数较为敏感,不同设定可能影响主题数量与边界,而且样本扩展的同时也可能引入噪声或域偏移,因而从语义嵌入到标签生成的过程是基于概率建模,结果体现的不是唯一真值而是统计意义上客观的显著模式。为增强稳健性,本文进一步通过多轮重抽样、参数扰动与对照建模,检验主题结构在不同设定下的重合度与收敛性。结果显示,主题划分在可接受参数区间内趋于稳定,并收敛于一个近似最小邻域。基于此,本文不追求唯一划分,而以稳定、可解释的近似解为目标,并结合领域知识进行复核。

经复核,本文发现先前在用 LLM 提炼主题名称时,因强调简练与可读,在少数情形下产生了语义压缩:为保持简练,生成的主题词结果可能遗漏关键限定词或极性信息(积极或消极),导致标签

语义不完整。例如,“难以替代性”维度下的“专用协议不兼容”被简化为“兼容性”,因而在直观上与该维度含义产生错位。为此,本文作了技术校准:在标签生成环节增加了限定词保留与对短语级输出的约束,确保否定或限制性表达不被删除;引入语义锚点与反例词表,避免为简洁性而产生语义极性的反转。经过调整,部分主题获得更为完整的表述,如“首创性”在修正后的模型下输出结果为“首次工程化实现”,该修正提升了标签的情境保留程度与维度一致性。

3. 分析结果

通过主题表征,可以评估各主题词在特定主题中的重要性,从而提炼出该主题的核心主题词。图 1 展示了 14 个主题中概率排在前 5 的主题词及其概率分布。

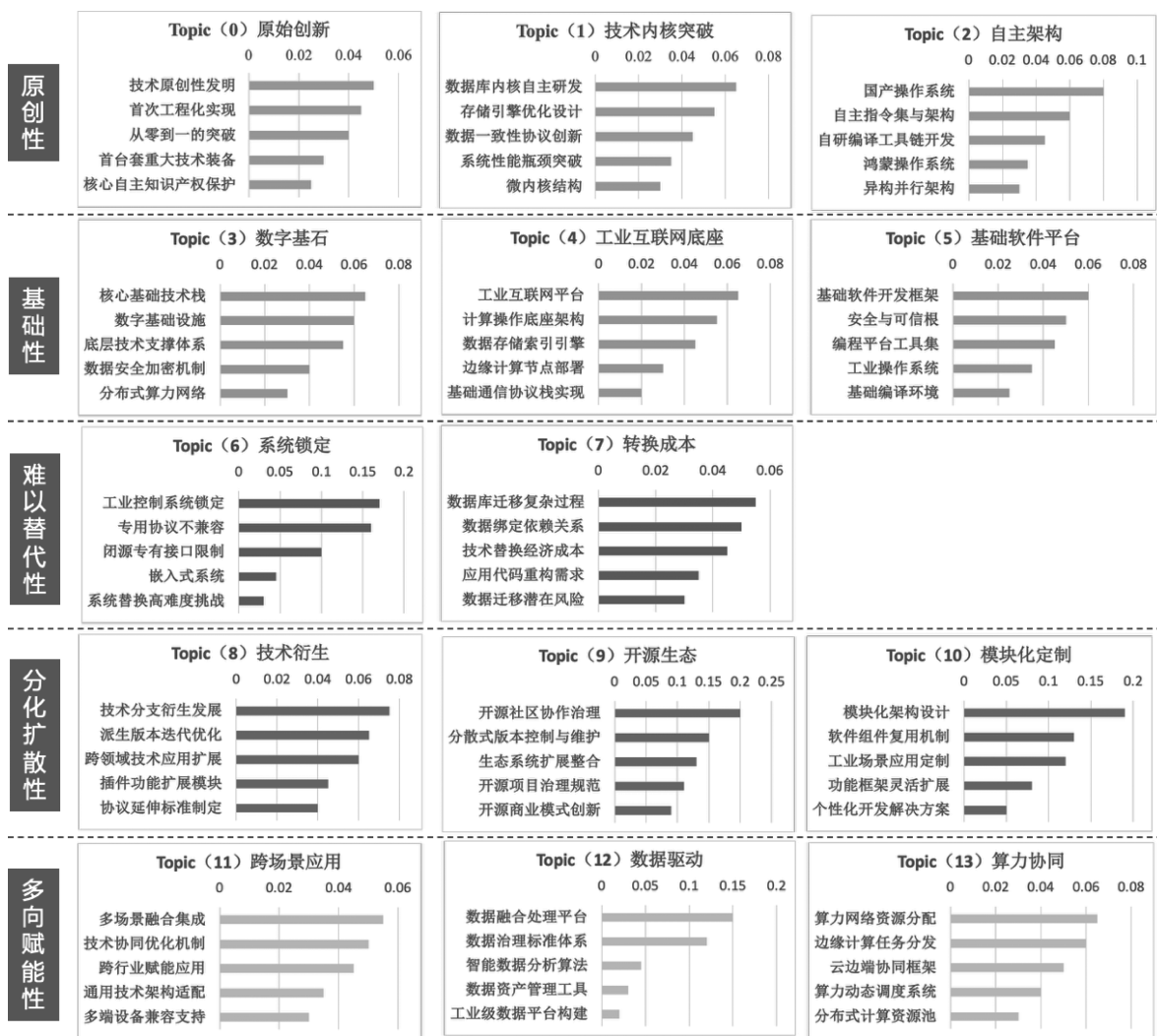


图 1 各主题前 5 个主题词及概率分布

根据各主题的内涵特征,可将其归纳为五个主要维度。

(1)原创性维度。通过主题模型分析发现,主题0(原始创新)、主题1(技术内核突破)和主题2(自主架构)都强调了技术从零开始的初始创新过程。这些主题中频繁出现“原创性”“从0到1”“数据库内核”“微内核”等高频词汇,表明科学家和企业和技术起步阶段格外关注原创性的突破、架构设计以及关键核心技术的自主研发能力。根技术的发展首先依赖于这种从无到有的原始创新和技术突破能力。因此,将该组主题归纳为原创性维度,体现根技术在从0到1阶段的原始创新与突破能力。例如,DeepSeek是一家专注于研究通用人工智能底层模型与技术的AI企业,其创始人在分析中国AI与美国的差距时,认为“我们经常说中国AI和美国AI有一两年差距,但真实的差距是原创和模仿之差”^[18]。马斯克在重型火箭回收中采用“地面塔架机械臂捕获”等新型回收方案,以第一性原理重构“结构—功能”的关系,原创性地使用地面外部设施替代火箭的着陆腿结构,减少火箭本身的冗余结构并提升回收效率。类似地,乔布斯在推动智能手机发展时,原创性地以“单一按键+手势”的架构简化交互复杂度,使人机关系由“人适应机器”转向“机器适应人,并在生态层面实现应用的持续涌现,推动手机从通信工具演化为数字生活中枢。

(2)基础性维度。主题3(数字基石)、主题4(工业互联网底座)和主题5(基础软件平台)强调了根技术在产业技术架构中的基础支撑作用,高频词包括“基础技术”“数字基础设施”“底座平台”“工业协议”“软件生态”等。英伟达创始人黄仁勋在演讲中表达雄心:“英伟达已不仅是一家科技公司,更是全球基础设施的核心提供者”^[19];华为创始人任正非也展望:“我们即将进入第四次工业革命,基础就是大算力”^[20]。这些论断预示算力、芯片、操作系统等根技术已被视为数字时代产业体系的基石。综上,这类主题被归纳为基础性维度,其内涵体现根技术在产业生态中的能力基座作用。华为公司在芯片、操作系统、数据库、编

译器等关键领域加大自主创新投入,以夯实自身技术根基。华为管理层提出“产品和应用背后的基础技术和根技术的研究,才是企业的核心竞争力”^[21]。华为创始人任正非就认为“如果不搞基础研究,就没根”^[22],华为坚持长期主义思维布局基础科研,形成了所谓的“压强式研发投入”模式。例如,极化码最初由土耳其学者阿勒坎提出,理论上可逼近香农极限,但因算法复杂难以工程应用。华为与阿勒坎取得了联系,并组织数学家团队通过算法优化以提升极化码的实际性能,使其成为5G控制信道编码标准,促进华为在5G领域的崛起。

(3)难以替代性维度。主题6(系统锁定)和主题7(转换成本)主要强调了根技术一旦被广泛采用所形成的路径依赖以及高替换成本特征。高频词包括“工控系统”“兼容性”“替换成本”“数据库迁移”等,反映出根技术应用规模的扩大导致采用替代技术面临的替换成本。数据库迁移便是典型例证:更换底层数据库意味着数据迁移、系统重构、性能重新标定及业务连续性受损等成本,替代者难以通过单纯的性能优势或价格竞争来弥补迁移中的损失。此外,随时间推移,根技术体系的学习曲线通常使得替代窗口期逐渐收窄,例如梁文锋也谈到:“英伟达的显卡理论上没有任何技术秘密,很容易复制,但重新组织团队以及追赶下一代技术都需要时间”^[23]。因此,将主题6和主题7统合为难以替代性维度,其内涵是根技术所具有的路径依赖和高置换成本的特征,一旦占据主导地位就很难被取代。从置换成本的视角看,根技术之所以表现出难以替代性,在于个体层面的置换成本与生态层面的网络外部性相互强化,并经由路径依赖固化为系统性壁垒。以显卡厂商英伟达为例,其推出的运算平台及与硬件深度耦合的编译器、驱动与各类库共同构成相互绑定的产品生态,长期迭代促使用户团队对其已经形成高度专用化的投入。此外,平台侧的用户规模与互补品丰富度提升了留存效用,离开英伟达产品生态的机会成本随时间上升。因而,即便其他平台在名义性能或采购价格上具备优势,也不足以覆盖上述置换成本。类似地,美国通用电气公司(GE)通过购入早期

外国专利到自身团队研发基础专利,在荧光灯问世之初就构筑了专利壁垒,但初期却是用来保护其原有的白炽灯业务。受制于生产设备更新与工艺、供应链与原材料、用户照明习惯与光质差异等方面的置换成本,荧光灯对白炽灯的替代出现了显著的时间滞后。二战时期,美国工厂对荧光灯节能性能的需求和订单才为荧光灯规模采用和推广创造了契机^[24]。可见,根技术一旦建立,置换成本便可构成了其难以替代性的重要因素。

(4) 分化扩散性维度。主题 8(技术衍生)、主题 9(开源生态)和主题 10(模块化定制)体现了根技术在产业应用过程中的扩散与演化特性。高频词如“技术分支”“派生版本”“跨域应用”“开源社区”“模块化”等突出显示,根技术可以通过不同分支和版本衍生,并在跨领域实现广泛扩散与生态繁衍。例如,一种基础软件往往会演变出多个派生版本以适配不同行业需求;模块化的设计则方便技术组件在不同场景组合复用。例如,华为余承东发布自主操作系统鸿蒙操作系统时宣称,“未来的操作系统应当是微内核架构,可以适配任意终端”^[25]。这些主题反映出根技术通过分支、模块化和开源生态来实现跨领域应用与扩散的能力,将其归纳为分化扩散性维度,强调其通过模块化解耦、开源生态协同、标准输出与复用,突破单一场景限制,在多元场景中衍生应用的能力。以华为鸿蒙系统为例,华为将其定位为“全场景操作系统”,通过让智能家居、健康监测、工业设备故障预测、智慧交通信号优化等多个领域产生的数据共同用于训练鸿蒙系统,以实现手机、汽车、物联网设备所谓的“无感协同”。再例如腾讯云和三一重工旗下“树根互联”合作的“根云”平台,则依托“通用平台+产业生态”的模式,将设备管理、数据采集、预测维护等能力“积木式”复用,并通过零/低代码工具降低企业的采用门槛,加速技术扩散。

(5) 多向赋能性维度。主题 11(跨场景应用)、主题 12(数据驱动)和主题 13(算力协同)突出了根技术在多场景、多行业中的协同赋能作用。高频词如“场景融合”“跨行业赋能”“数据融合”“云边协同”等表明,企业、投资者和政策决策者都

期望利用根技术在不同场景之间形成协同效应,驱动多行业的数字化转型实践。例如,“云—边协同”架构的兴起使数据和算力与边缘设备的实时能力结合,共同服务于多业融合的新需求。因此,将主题 11~主题 13 概括为多向赋能性维度,其内涵是根技术穿透行业、场景、领域的复杂壁垒并实现深度融入和广泛辐射的赋能作用。基于罗斯托的经济“起飞由主导部门的技术突破牵引”的增长阶段论^[26],根技术的多向赋能沿三径展开:前向效应表现为根技术沿自身技术路径持续衍生新兴产业,如 OpenAI 的 GPT 大模型推动了 AI 应用生态链的形成;后向效应则体现为根技术对传统产业流程、技术组合的改造升级,如将 5G 和 AI 技术向传统煤矿采掘传输行业渗透,通过“井下物理矿、井上虚拟矿”减少矿井下作业人数和降低风险;旁侧效应则强调根技术在看似不相关的场景中发生跨界迁移与重组创新,如英伟达 GPU 芯片最初用于游戏显卡渲染,却扩散到医学影像分析和金融量化交易领域。根技术的多向赋能本质上有赖于其对行业/领域壁垒的穿透性,以及在更高维度上构建新模式解构原有难题并消解壁垒的能力。例如,亚马逊在云计算领域先行部署的 AWS 云平台以按需的弹性计算与存储,降低各类企业自建机房的投入与门槛,使企业可以“即开即用”世界级基础设施,改变各行业的算力部署方式。原本只属于大公司的算力下放给个人与初创企业,支撑起普惠计算。由此,穿透并消解了数字基础设施构成的行业壁垒,加速了金融、制造、教育、科研等领域的数字化转型。再例如,蛋白质结构预测被称为生物学“登月级”的难题,AlphaFold 所构建的给定氨基酸序列前提下的结构预测范式,在更高维度上重新定义了破题方法:过去依赖昂贵且耗时的实验手段才能解析蛋白质结构,现在借助 AI 在几分钟内即可预测出蛋白质折叠成的三维结构。

本文提出的原创性、基础性、难以替代性、分化扩散性、多向赋能性 5 个核心维度之间确实存在逻辑关联与潜在交叉。例如,原创性的突破往往为基础性奠定条件,而在原创性和基础性兼具的情形下,技术的难以替代性似乎能够成为一种自

然推论。本文承认现有框架下各维度的划分并非完全独立,存在一定的相关性,但这类相关性并不必然严重地削弱各个维度的学理分析价值。类似的,Barney^[27]提出资源基础观(RBV)时,构建了用来判断资源能否带来持续竞争优势的VRIN四维框架(资源的价值性、稀缺性、难以模仿性、不可替代性),该框架后被广泛用于解释企业差异化绩效的根源。Barney的四维框架曾被质疑部分属性的维度存在交叠:“难以模仿”与“不可替代”间的边界模糊。对此,Barney^[28-29]在后续研究中强调,这些维度虽然相互关联,却分别指向不同的理论功能和作用机制,因而并列设定在理论上仍具必要性。本文重点是探究“何以是根技术”之不同侧面的必要且互补的维度,因而借鉴Barney等划分维度时所采用的权衡策略:在现有理论与数据条件下,既要力求减少对关键机制的遗漏,又要为量化测度与跨主体比较提供清晰而可检验的维度基础^[30-31]。

本文使用折线图(见图2)反映科学家、企业家、投资家、政治家及公众等主体对根技术在不同发展阶段的认知程度。

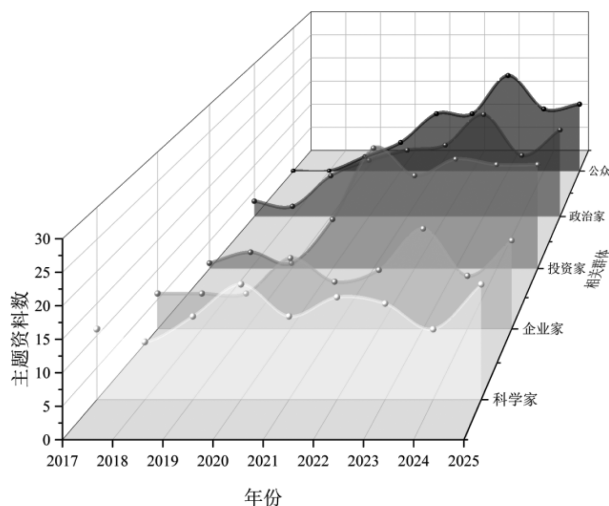


图2 相关群体关于根技术主题文献的演变趋势

如图2所示,2017—2025年五类主体(科学家、企业家、投资家、政治家、公众)对根技术的关注总体呈上升态势,并伴随阶段性波动。2023年以后,多数主体进入相对高位区间。2024—2025年,整体维持在中高位且仅有小幅起伏,显示议题热度的广泛

化与稳态化。其中,科学家在早期(2017—2019年)已率先抬升,此后增幅趋缓;企业家与投资家在2020年后整体上行,并在2023—2024年前后出现阶段性高位;政治家与公众在2023年后明显上扬。各群体曲线在若干年份出现交错与重叠,体现出关注强度的此消彼长与同步共振。在2024—2025年,5类群体的关注度虽有小幅波动但整体维持在较高水平,表明根技术的议题已在学界、产业界、资本市场、政策、社会层面形成一定共识与持续关注。

进一步地,通过对根技术不同维度的关注度进行更细颗粒度的分析发现:原创性维度在整个观测期内波动较小,科学家群体占比维持在较高水平,体现了科学家群体对根技术原创突破和原理探究的长期聚焦与持续投入,为根技术概念奠定了理论基础。特别是在“0到1”的原创性阶段,学术论文与科研项目更为活跃,科学家群体的早期贡献奠定了概念与方法论基础。在随后的“1到10”的基础突破和扩散阶段,如从2020—2021年企业家对根技术的基础性维度的关注上升,这一趋势与企业主导的专利活动快速增加密切相关,反映出企业家群体通过组织专利申请与授权,在工业互联网、国产数据库等领域系统地推动技术从实验室样品到规模化产品落地的过程,实现了根技术概念从理论到实践的跨越,企业家逐步成为技术推广与应用扩散的主导者。接着,进入“10到100”的商业化阶段,如在2021年对投资家群体对根技术的难以替代性维度呈现较高关注度,这一趋势还体现在投融资事件文献类型的显著增长,显示出投资家群体重点关注技术的生态锁定效应和高替换成本的经济后果。资本市场与投资家群体逐渐重视根技术生态的稳定性与投资价值,资本的进入也进一步加速了根技术概念的市场化验证进程。在2022—2023年,投资类事件数量保持高位,而且对根技术分化扩散性维度的关注升温,网络社区类文本也较快增长。这反映了网络社区文本与投融资事件类型的高频互动,说明公众与投资家群体在技术生态扩散阶段发挥重要作用:公众围绕技术扩散带来的风险、伦理与消费价值展开讨论,资本侧则瞄准根技术的跨行业延展与

跨域复用的机会。从 2023 年开始,政治家与公众群体对根技术的多向赋能性呈现较高关注,网络社区文本和政策文本都较多讨论根技术在多场景融合和跨行业赋能方面的作用。其中,政治家通过政策文本题现其对根技术的社会影响与产业发展方向的引导,而公众则在网络社区积极参与技术伦理、安全等话题的讨论。

结合前述分析与房汉廷^[1]的研究,两者对根技术生命周期的认识高度契合。房汉廷^[1]将生命周期划分为种子期、筑根期、涌现期、爆发期与泛在期。本文基于主题建模得到的五个维度(原创性、基础性、难以替代性、分化扩散性、多向赋能性)在演化走势上与上述阶段相互印证:原创性主要对应种子期与筑根期,突显科学家在原始创新中的主导;基础性与难以替代性主要对应涌现期与爆发期,反映企业家与投资家介入扩散与商业化、关注规模化应用与市场潜力;分化扩散性与多向赋能性主要对应爆发期与泛在期,在此阶段,政治家与公众通过政策制定、制度监管与舆论引导,推动技术在更广泛社会领域的深度融合与普及。

在生命周期演进中,供给端主体(科学家、企业家、投资家)对根技术形态的影响权重通常高于需求端公众。公众作用主要在泛在期凸显,其通过社会伦理规范与公共监督提升技术与社会发展的协调性,而非在种子期提前以需求臆断研究方向。事实上,公众难以在颠覆性技术出现之前准确预见其需求(如互联网出现前,移动支付尚未进入公共想象)。根技术遵循“根部源发、向上扩散”的演化特征:末端应用形态由根部核心属性界定,而非单由场景或市场需求塑造。场景创新虽贴近需求、表面上缩短“从实验室到市场”的距离,但本质是对既有要素的情境化集成,难以改变根技术既定范式与边界。尤其在缺乏底层原理与关键技术掌握的情况下,场景侧多局限于既定可行域内的微创新,难以形成新的技术轨迹。片面追逐场景创新往往反映基础研究与底层技术储备不足,可能加剧技术主权脆弱与断供风险。以高通为例,通过掌控无线通信领域的根技术(如基带芯片架构)先发定义智能手机通信标准,获得对下游企业的持久依赖与专利

收益;即便终端企业在应用场景上快速追赶,仍易受其专利壁垒与技术诀窍(know-how)制约。

政府在爆发期的一项关键职能是打破市场分裂与生态碎片化,推动统一标准与规模扩散。以北斗导航为例,政府以强制性行业标准整合分散应用,促进其由军事领域向交通、农业等多场景延伸。政府亦可充当“公共投资者”:在涌现期建立试错与容错机制,在爆发期撬动规模化的资本。美国的小企业支持政策体系——SBIR(Small Business Innovation Research)与 SBIC(Small Business Investment Company)——提供了分阶段工具:SBIR 聚焦技术发现,分三阶段投入以覆盖“可行性验证—原型开发—政府采购引导商业化”的链条;SBIC 聚焦价值培育,借助政府信用担保撬动私募资本,针对量产的资金缺口提供准市场化供给。此类阶段性制度设计既避免政府在种子期直接干预研究路径的风险,又通过风险分担协调科学探索的长期性与资本回报的短期性。

根技术在种子期极难识别,具有强个体驱动性和弱可预测性。其识别难点包括:①违背规模效应逻辑,关键突破常集中于极少数人(如作为互联网运行基石的 TCP/IP 协议仅由文顿·瑟夫和罗伯特·卡恩两位科学家定义),而规模化的研发团队在筑根期作用更明显;②由意外发现主导,创新往往源于偶然性事件而非计划,如弗莱明因培养皿污染识别出青霉素抑菌效应,日本岛津公司职员田中耕一在挽救失败试验中意外发现新的生物大分子质谱分析法并获诺贝尔化学奖;③依靠天才想法闪现,天才思维能穿透复杂结构并洞见隐藏在其中的机会,如乔布斯基于“结构决定功能,功能服从体验”的理念,将手机重构为“触控交互+应用生态”的架构革命,而非单纯的硬件创新。

针对种子期的识别,可以从个体与生态两个维度着力。其一,聚焦天赋异禀且具有跨域整合能力的个体,并结合其历史行为特征进行识别(如马斯克跨越航天、能源与脑机接口的跨界创新,或张汝京在大陆建设晶圆厂所体现的逆共识韧性)。同时,可从泛在期的社会需求反推种子期的理论“基因”,如美国国防部高级研究计划局(DARPA)在脑机接口领域回溯发现,柔性电极材料决定临床安全性,进而支持

相关神经材料研究(如 Synchron 公司)。Synchron 公司是由 DARPA 与美国国防部资助并在墨尔本大学孵化的实验室演化而来。Synchron 将研发重点置于神经康复、神经调节、神经诊断与脑机接口,并已成为全球首个获美国 FDA 许可开展永久植入式设备人体临床试验的脑机接口企业。其二,识别可能孕育根技术的区域生态。以杭州“六小龙”的崛起为例,区域创新生态通过容错机制包容早期失败,杭州以国资母基金与社会资本合作、尽职免责等制度安排为试错“兜底”,允许部分项目亏损而不被视为失职,“六小龙”中的宇树科技等部分企业曾获得杭州国资的早期支持。该区域政策还保护失败者并鼓励其再次申请资金。容错机制并非简单宽松,而是适应不确定性的制度安排,在规则内为科研人员与管理者兜底,缓解职业风险,支持长期主义与大胆探索。

二、基于扎根理论方法的根技术维度探索

(一)理论取样

本文采用扎根理论范式探索构建根技术的维度。依据理论取样原则,从半导体、新能源、生物医药、人工智能与航空航天等行业选取技术专家与管理人员;为确保认知与实践基础,前期通过问卷筛选合格受访者。首先对 9 位受访者开展深度访谈以搭建理论模型,随后再访谈 3 位用于理论饱和度检验。如果对新增资料的分析未产生新的实质性概念或范畴,则表明核心范畴已达饱和。

(二)数据收集

本文采用一对一半结构化深度访谈收集数据。首先,研究团队拟定了访谈提纲。提纲围绕根技术的内涵理解与实践识别等核心问题展开,包含一系列开放式问题,如“您如何理解‘根技术’这一概念?”“在您的工作中如何识别某项技术是否属于根技术?”“您认为根技术具有哪些独特的属性?”等。由研究人员按预设框架灵活引导,促使受访者充分表达。访前向受访者说明研究目的、访谈规则与保密措施并取得知情同意;访谈过程中营造开放与信任的氛围,必要时追问细节,并以情境导入激发回忆。在获得许可后全程录音。访后将录音转写为文本并进行受访者确认,以确保

准确性。单次访谈时长 45~60 分钟,全部形成完整文本,为后续编码分析提供可靠依据。

(三)编码过程

1. 初始编码

首先,在开放编码阶段,研究人员对收集到的 9 份访谈逐字逐句进行分析,给重要信息贴上概念标签。从原始资料中提炼出初始概念,如表 1 所示。这些初始概念经过梳理和比较,研究团队合并了含义相近或重复的概念,保证概念的明确性和独立性。

表 1 访谈对象 1 的初始编码(开放性编码)示例

访谈对象 1 原始访谈资料语句摘录	开放性编码 初始概念
“光刻工艺结合光学、机械、电子、材料等多学科,非常有挑战性。”	1-1 多学科交叉挑战
“国内在尖端光刻设备上还是空白……落后国际先进水平不少。”	1-2 技术落后现状认知
“国家启动了大的集成电路装备研制专项,我们团队……参与筹建。”	1-3 国家重大专项支持
“只能靠自己创新……走出一条自己的路。”	1-4 自主原创创新决心
“光刻设备决定着芯片制造的极限水平,被称为‘皇冠上的明珠’。”	1-5 光刻技术基础性支撑
“如果被别人卡住脖子,整个产业都会受制于人。”	1-6 技术不可替代性
“我……坚守了二十多年,也亲眼见证了从无到有的巨大变化。”	1-7 坚韧使命感
“我们研制出第一台国产的投影式样机……国内零的突破。”	1-8 国产化零的突破
“双工件台系统……国内首次自主实现这一关键技术。”	1-9 关键子系统突破
“逐步构建自己的供应链和技术体系。”	1-10 自主供应链构建
“申请了大量专利……完全自主正向设计。”	1-11 专利与正向设计
“技术扩散到封装、显示、LED 等多个领域。”	1-12 技术分化应用
“在封装光刻设备国内市场占有率远超同行。”	1-13 市场领先地位
“带动了上下游伙伴共同成长。”	1-14 生态链协同
“跨学科协作和系统工程方法锻炼团队。”	1-15 人才综合能力
“实行分级保密制度,建立知识库。”	1-16 技术保密与传承
“建议政府保持政策连续性、提供首台套补贴。”	1-17 政策支持诉求
“下游晶圆厂愿意提供生产线试用支持国产设备。”	1-18 用户协同验证
“根技术是国家科技安全的‘压舱石’。”	1-19 科技安全战略
“拥有根技术才能攀登价值链高端,形成竞争力。”	1-20 产业竞争力提升
……	……

2. 选择编码

进入选择编码阶段,依据持续比较法将开放编码得到的概念聚合与归并,提炼子范畴以刻画根技术的不同侧面。随后按扎根理论的理论编码比较各子范畴的关联与层级,抽取高阶主题,最终凝练出 5 个核心范畴(见表 2),形成根技术的维度架构。编码过程经多轮小组复核以确保一致性;在对额外 3 份访谈的验证中未出现新增范畴,表明已达理论饱和。

3. 理论编码与核心范畴

本文构建根技术的多维概念模型,提炼出 5 个核心范畴:原创性、基础性、难以替代性、分化扩散

性与多向赋能性。原创性强调原生理理论突破、路径独创与要素首创,界定“从 0 到 1”创新起点;基础性体现平台架构控制、对基础设施的深度嵌入及在技术与产业网络中的枢纽地位,奠定上层应用与衍生技术的底座;难以替代性源于生态锁定、知识产权壁垒、系统耦合与稀缺资源,并在持续代差支撑下形成高替换门槛;分化扩散性体现在路线裂变,产业重组催化与技术、市场、制度的共演化,推动多场景复制与跨域传播;多向赋能性通过跨域适配与兼容扩展辐射范围,降低关联领域试错成本,形成面向多部门的综合赋能。后续研究将在此框架上推进量表开发与实证检验。

表 2 选择编码结果

核心范畴	子范畴	对应的初始开放式编码概念及原始访谈资料语句摘录
原创性	原生理理论突破	设计成形数字链路首创(增材制造打通从设计到成形的数字链路,重塑制造流程)……
	技术路径独创	跨界微内核路线(基于 OpenHarmony 微内核打造工业 OS,实现跨领域技术融合)……
	核心要素首创	双工件台关键要素首创(双工件台系统国内首次自主实现这一关键技术)……
基础性	技术平台架构控制	工业 OS 平台支撑(工业控制 OS 作为统一开放平台,支撑智能制造海量应用)……
	基础设施嵌入	边缘计算基础底座(边缘平台相当于一个“底座”,连接设备、算法与云端)……
	网络中心节点地位	边缘协同枢纽(边缘平台在边—云—边协同中充当关键节点,汇聚分散算力网络)……
难以替代性	产业生态锁定	IP 生态锁链(IP 形成生态锁定效应,全流程被锁在其平台,替换成本极高)……
	知识产权壁垒	专利群战略壁垒(在固态电池领域已提交上百项核心专利申请)……
	系统耦合复杂度	设计—制造深耦合(芯片设计需与制造工艺深度耦合,设计—制造一体化程度高)……
	稀缺资源独占性	稀土战略稀缺(中国拥有全球最大的稀土提炼能力,可作为技术博弈筹码)……
	技术代差可持续性	高端光刻代差垄断(EUV 光刻机几十年积累形成独步天下标准,后来者难追)……
分化扩散性	技术路线裂变能力	行业场景裂变(边缘 AI 技术在安防、工业、交通、医疗、能源多行业分化扩散)……
	产业重组催化能力	分布式制造重组(增材制造推动制造业范式转变,实现数字化分布式制造)……
	技术—市场—制度共演化	战略—政策共振(边缘计算被纳入国家算力网络战略,多层政策与基金协同推进)……
多向赋能性	跨域适配与兼容	微内核跨域兼容(OpenHarmony 微内核从消费电子嫁接到工业控制,跨域兼容)……
	技术辐射的产业领域数量与异质性	设计反向协同辐射(芯片设计进步反向驱动制造工艺、算法、软件协同升级);开源 IP 多样化(开源 IP 核涌现,降低芯片设计门槛,形态日趋多样)……
	降低关联领域研发试错成本的能力	开源 EDA 降本(开源 EDA 工具链兴起,显著降低芯片研发成本与门槛)……

注:括号内的字表示原始访谈资料语句摘录。

三、根技术测量量表开发的定量研究

在既有根技术维度模型基础上,经相关领域专家评审形成初始量表;随后采用问卷法开展预调研与正式调研。量表开发遵循多数共识原则,流程如下:首先,基于文献与深度访谈,由技术经济与管理专业博士生讨论提出 63 个初始题项;其次,邀请创新经济学、技术经济与创新管理等领域专家审查,剔除表述不当或重复项,确定 25 个初始题项;再次,开展预调研以筛选并确定最终题项;最后,组织正式调研并检验量表的信度与效度。

(一)预调研及量表提纯

本文根据 25 个初步筛选的题项编制了问卷,随后请参与者根据自身的亲身经历,采用李克特 7 点量表对各题项的重要性程度进行评分。具体而言,通过问卷星平台发放问卷 227 份,剔除一些填写前后有明显矛盾或回答时间过短的无效问卷后,最终回收有效问卷 158 份。

1. 量表提纯

依据两项准则对 25 个初始题项进行提纯:一是单项与总体的相关系数(CITC 值)高于 0.50 且显著;二是删除该项不致降低(或可提升)所属维

度的克隆巴赫 α 系数。采用 SPSS 26.0 进行信度分析。分析表明:“业内主体普遍认为该技术采用前所未有的实验/制造方法,改变传统范式”“业内主体普遍认为该技术突破会整体牵引产业链升级”和“业内主体普遍认为该技术对本领域之外的产业影响有限(反问题)”3 个题项 CITC 值均小于 0.5,且剔除后相应维度的克隆巴赫 α 值上升,故予以删除。删减后,量表整体的克隆巴赫 α 提高,各维度的克隆巴赫 α 均超过 0.70,内部一致性较为理想。提纯后的量表题项如表 3 所示。

表 3 量表提纯结果

潜变量	测量题项
原创性	OR1:业内主体普遍认为该技术源自全新的科学或工程原理,属领域首创
	OR2:业内主体普遍认为该技术重构了既有系统架构,形成全新技术框架
	OR3:业内主体普遍认为该技术开辟了此前缺失的应用场景与商业模式
	OR4:业内主体普遍认为该技术仅对现有主流技术做了渐进式小幅改进(反问题)
基础性	FU1:业内主体普遍认为该技术被视为本领域技术体系的“底座”或“基石”
	FU2:业内主体普遍认为该技术决定了相关产品/服务的性能上限与迭代节奏
	FU3:业内主体普遍认为该技术与多种配套技术高度耦合,形成稳定生态
	FU4:业内主体普遍认为即便缺失,对产业生态运行影响有限(反问题)
难以替代性	DR1:业内主体普遍认为该技术在可预见时期内难以被其他技术路径等效替代
	DR2:业内主体普遍认为该技术形成了高水平的专利与知识壁垒,替代成本高昂
	DR3:业内主体普遍认为下游技术对该技术存在明显路径依赖,替换风险大
	DR4:业内主体普遍认为即便有潜在替代路线,也需长期系统投入才能企及其性能
	DR5:业内主体普遍认为已有多种替代方案能以相近成本与性能快速取代该技术(反问题)
分化扩散性	DD1:业内主体普遍认为该技术可在不同行业/场景快速衍生出多样化的应用版本
	DD2:业内主体普遍认为该技术升级迭代常伴随分化出针对细分场景的配套方案
	DD3:业内主体普遍认为该技术跨越迁移过程中表现出良好的可塑性与适配度
	DD4:业内主体普遍认为其核心知识能被不同学科/产业再创造、演变并迅速传播
	DD5:业内主体普遍认为该技术应用形式单一,对不同场景几乎难以差异化调整(反问题)
多向赋能性	ME1:业内主体普遍认为该技术正在催生新的产业或商业生态
	ME2:业内主体普遍认为该技术为多学科/多产业的前沿研究提供关键工具
	ME3:业内主体普遍认为该技术显著提升了所在行业整体创新效率
	ME4:业内主体普遍认为该技术赋予拥有者在技术生态中的主导与定价权

2. 探索性因子分析

对预调研样本的 22 个测量题项开展探索性因

子分析。KMO 值为 0.913, Bartlett 球形度检验近似卡方为 2 383.714 ($p < 0.001$)。这表明,数据适合进行分析。采用主成分法提取特征值大于 1 的因子,并以最大方差法正交旋转,共获得 5 个因子;各题项在对应因子上的载荷在 0.624 与 0.837 之间,均高于 0.60;累计方差解释率为 73.557%。结果表明,根技术量表的建构效度良好。

(二) 正式调研及量表检验

正式调研采用两种方式收集问卷:其一,通过微信群、朋友圈与微信好友转发电子问卷并设置激励;其二,借助问卷星样本服务按设定条件定向发放。共发放问卷 533 份,回收有效问卷 409 份,有效回收率为 77%。将有效样本随机分为 A 组 ($n = 203$) 与 B 组 ($n = 206$),A 组用于探索性因子分析,B 组用于验证性因子分析,并在总样本 ($n = 409$) 上开展信度与效度检验。独立样本 t 检验结果显示,两组在性别、年龄、学历等变量之间不存在显著差异。

1. 信度检验与探索性因子分析

首先,利用 SPSS 26.0 软件对 A 组数据 ($n = 203$) 进行探索性因子分析。结果显示,KMO 值为 0.908,且经过巴特利特球形度检验,说明数据适合进行因子分析。接着,采用主成分分析法提取特征值大于 1 的因子,并使用最大方差法进行正交旋转,22 个题项正好归属于 5 个公因子,每个题项对应因子的载荷值均高于 0.722,且并未发现因子间的交叉负荷情况,总方差解释率达到 73.977%,说明提取出的 5 个因子是合理的。

2. 验证性因子分析

利用 AMOS 24.0 软件对 B 组数据 ($n = 206$) 进行验证性因子分析,通过比较单因子、二因子、三因子、四因子和五因子模型,以确定最合适的模型结构。模型适配度的评估依据以下标准: χ^2/df 值为 1 ~ 3 表示模型具有较好的简约适配性, RMSEA 值小于 0.05 则表明模型适配度良好,而 GFI、NFI 和 CFI 高于 0.9 则表明有模型适配度良好。分析结果表明,区分这五个因子的模型拟合最佳 ($\chi^2/df = 1.294$, RMSEA = 0.038, GFI = 0.914, NFI = 0.914, CFI = 0.979),且相较将因子逐步合并的四因子、三因子、二因子与单因子模型,其拟

合显著更优:随合并程度增加, χ^2/df 从 2.787 升至 7.897, RMSEA 从 0.093 升至 0.183, CFI 从 0.868 降至 0.477 (GFI/NFI 同步下降), 表明五因子模型的拟合效果理想。

3. 收敛效度和区分效度检验

使用 AMOS 24.0 对总样本($n=409$)进行验证性因子分析, 检验根技术量表的收敛效度与区分效度。分析结果显示, 所有测量题项的标准化因子载荷在 0.731 与 0.890 之间(均高于 0.60), 各构念的复合信度 CR 在 0.870 与 0.916 之间(均高于 0.70), 平均方差提取 AVE 在 0.628 与 0.688 之间(均高于 0.50)。总体而言, 量表具有充足的内部一致性与收敛效度, 可为后续结构模型检验提供可靠测量基础。此外, 5 个潜变量的 AVE 平方根值均大于各变量之间的相关系数, 进一步证实了本研究所构建的根技术测量量表在区分效度上也充足。

4. 效标效度检验: 根技术与供应链韧性

本文将供应链韧性作为检验根技术量表效标效度的关键外部指标。现有研究强调, 在企业决定实施供应链风险管理实践之前, 应当评估自身的技术能力及其对供应链韧性的影响, 并指出企业的技术能力将影响企业供应链的应变能力^[32], 比如增材制造等数字化技术对供应链效率和韧性产生显著影响^[33]。供应链韧性的测量借鉴 Baz 等^[34]及马潇宇等^[35]的量表设计。

从根技术的原创性维度对供应链韧性的影响分析, 原创性反映了技术在原理层面的新颖程度与知识组合的异质性, 其效应是打破既有路径锁定, 在供应中断时有潜力创造或获取新的竞品, 为供应链提供可替代的技术供给路线。原创性还常与首创专利、先占标准相伴, 提升对关键知识要素的主导权, 减小被“卡脖子”的风险敞口。实际上, 现有研究发现, 创新氛围更浓厚的企业往往更具韧性^[36]。根技术的基础性体现其作为底层架构, 承担多类产品/工艺的通用平台的功能。通用平台可以通过信息共享、联合规划和物流协作等功能, 对供应链韧性产生正向影响^[37]。凭借着占据通用平台的位置, 供应链企业便于扩展关键部件/材料/产品的可获得集, 以不同构件/流程/工艺等实现等效的功能, 使供给波动的连锁性下降。根

技术的难以替代性, 反映了供应链企业在面临断供挑战时的反挟制能力。多点竞争战略指出, 企业在多个市场维度存在竞争交集时, 可以通过跨市场布局形成竞争优势^[38]。掌握难以替代的根技术的企业, 在面对发出断供威胁的企业时, 有能力做出跨市场的回击、形成战略威慑。根技术具有的分化扩散性意味着, 更快的扩散使多主体协同学习与互补创新加速, 当面临技术封锁时有潜力缩短从试验到量产的学习曲线。多向赋能性指根技术对上下游、多场景、跨行业的赋能, 从而催生多源输入、多路径输出的高连通性的供应链网络结构, 使某一网络节点受损时, 体系可迅速启用备用路径或跨域迁移机制, 降低供应链中断的风险。简言之, 根技术以其原创性、基础性与难以替代性为核心零部件与关键工艺提供自主可控的技术底座, 并通过分化扩散性与多向赋能性为供应体系注入裕量与多元选择, 减少对单一外部技术与供应方的依赖、缓解“卡脖子”风险、催生多元供应生态并提升备份产能与替代路径。因此, 可以预期根技术水平与供应链韧性指标之间存在显著的正相关关系。

为降低共同方法偏差, 本文在测量根技术、供应链韧性与价值链协同能力时实施时间分离、空间分离与方法分离, 并将企业成立年限、员工规模、国有属性与行业背景等纳入控制。新一轮问卷共发放了 31 份, 回收有效样本 234 份, 用于效标效度检验。哈曼单因子检验显示: 未旋转条件下提取 8 个特征值大于 1 的因子, 第一因子方差解释率为 35.817%, 低于 40%。信度方面, 各变量的克隆巴赫 α 系数介于 0.855 与 0.896 之间, 均高于 0.70。验证性因子分析表明: 标准化因子载荷在 0.714 与 0.905 之间, 复合信度 (CR) 在 0.859 与 0.897 之间, 平均方差提取量 (AVE) 在 0.604 与 0.645 之间; 同时, 各构念 AVE 的平方根均大于构念之间的相关系数, 收敛效度与区分效度良好。

通过将供应链韧性、价值链协同能力作为因变量, 以公司成立年限、公司员工规模、公司是否国有企业等为控制变量, 将根技术的 5 个维度原创性、基础性、难以替代性、分化扩散性、多向赋能性作为自变量进行回归分析。在回归模型中, 控制

变量纳入后,模型的解释力提升(调整 R^2 从 0.046 增至 0.469)。在各维度中,基础性($\beta = 0.308$, $p < 0.001$)、难以替代性($\beta = 0.258$, $p < 0.001$)、多向赋能性($\beta = 0.247$, $p < 0.001$)和原创性($\beta = 0.205$, $p < 0.001$)对供应链韧性具有正向影响,均达到 1% 显著性水平;而分化扩散性对供应链韧性的影响不显著($\beta = 0.051$, $p > 0.1$)。结果提示,分化扩散性的效应具有条件性或阶段性,可能依赖于供应链网络的风险管控等配套策略^[39];在配套不足时,扩散可能更近似规模扩张而非替代路径增加,因而难以转化为韧性提升。总体而言,结论与理论预期一致,根技术多维度与供应链韧性之间存在显著正相关,量表的效标关联效度较高。

四、研究结论与启示

(一) 研究结论

本文综合运用主题建模、访谈与扎根理论,提出并实证检验根技术的五维结构,即原创性、基础性、难以替代性、分化扩散性与多向赋能性。我们先以多源文本的主题建模识别维度,再经三轮扎根编码凝练其内涵与边界;探索性与验证性因子分析表明模型的结构效度良好。基于该框架开发根技术量表,实现识别与量化评估。多元回归结果显示,原创性、基础性、难以替代性与多向赋能性显著提升企业供应链韧性,表明强化根技术创新既关乎科技安全,也能转化为韧性优势。

(二) 理论贡献与管理启示

理论上,本文首次验证了根技术概念的核心维度结构,将根技术从宏观战略话语转化为具备可度量维度的学术概念,开发了具有较高信效度的根技术测度模型,弥补了国内外尚无用于根技术测度工具的缺口。本文通过严格的探索性与验证性因子分析。构建的根技术五维度模型,揭示了科学家、企业家、投资家、政治家与公众等不同主体在根技术生命周期各阶段存在的认知差异,同时为企业、产业及国家等多个层面的管理决策提供启示。

在微观层面,应重视企业在根技术创新链上的主体作用,同时整合高校与科研院所在研发链阶段及企业在技术商业化阶段的各自优势。特别是,要适应根技术、根原创甚至是根原理日渐发轫

于科技新锐企业和领军企业的创新链新形态。虽然根技术因其具有的分化扩散性和多向赋能性,会产生知识外溢的结果,但是根技术严格意义上并非公共产品,最终会收敛形成可界定的产权边界,为根技术形成根产业、延伸至干产业提供收益保障,从而为企业创造超额回报和竞争优势。企业在根技术创新过程中,可以将五维度模型嵌入战略决策与资源配置过程:一是聚焦原创性与基础性,回溯技术问题的第一性原理,建立企业内部的原始创新实验室或技术范式重构团队,设立具有“耐心资本”特征的根技术基金,培育并沉淀技术源头理论和基础学科的研究成果,持续开展“从 0 到 1”的原创性技术架构突破,实现关键技术内核与底层架构的自主可控;二是强化难以替代性维度,打造与根技术深度绑定的产品生态,扩大产品用户规模与互补品丰富度,利用网络外部性增强用户留存效用,提升用户迁移的置换成本与生态黏性;三是以分化扩散性和多向赋能性为导向,围绕根技术原生优势持续衍生新业态,增强根技术的穿透性和高维解构能力,以更高维的技术范式消解行业间壁垒和固有难题。

在介观层面,平台型组织、网络组织与虚拟组织等可以促进根技术创新的跨层级互动和协同。“介观”概念源自物理学范畴,强调在宏观与微观之间存在特殊结构及跨尺度耦合效应。根技术的原创性与基础性突破,往往在跨层级的知识流动与资源组合中涌现。平台型组织的模块化与“核心+外围”结构为这种突破提供了制度土壤:核心模块负责内核突破与通用底座(如操作系统、算力平台),外围模块由大量互补创新者进行应用探索,形成“核心创新—互补创新”的正向循环。根技术的难以替代性,本质上是用户置换成本和生态网络外部性的相互强化。平台组织在介观层面通过平台导控机制的设计,可以提高参与者的专用性投资,并通过网络效应累积数据与互补品,为掌握根技术的主体创造可持续竞争优势。介观层面的联盟机制和传播机制有助于强化根技术分化扩散和多向赋能,如虚拟组织作为松散耦合和柔性协作的动态联盟,以共同愿景为基础灵活组建,有助于推动根技术对上下游和旁侧行业的穿透,

如通过虚拟联合实验室与虚拟孵化网络突破传统组织边界汇聚创新资源,加快根技术的跨界迁移和应用。此外,产业基金、联合投资联盟以及企业风险投资构成的投资者网络也构成介观支撑体系,通过对不同行业企业的股权嵌入,发现并推动根技术在新领域中的落地。例如,半导体基金在芯片产业链投资中,不仅支持设计环节的技术原创,还推动其对汽车、能源、医疗等领域的多向赋能。

在宏观层面,政策制定者可借助本测度模型科学地甄别和评价根技术,完善“识根—评根—育根”的政策支持链条。政策制定者应尊重专业群体的判断,充分吸收科学家在“从 0 到 1”、企业家“从 1 到 10”及投资家“从 10 到 100”等根技术各发展阶段的意见。政策制定者还应保持战略定力,警惕被缺乏专业深度的舆论或公众情绪波动所裹挟,并避免被场景创新的短期繁荣迷惑而产生误判,从而坚持长期主义加强根技术支持政策的延续性和稳定性。场景创新的目标明确能缩短科技转化的链条,但是根技术决定了对场景背后底层范式的解构和重构能力,进而影响国家的技术主权和在全球化分工中的价值链攀升。此外,政策制定者应保持克制而理性的中立态度,避免直接替代科学判断或市场选择,防止通过行政指令过度干预根技术的发展路径,并将政策重点转向包容普惠性的公共品和服务供给,如完善知识产权保护机制、提供开放共享的基础科研平台等。政府作为公共投资者,可以为培育根技术提供耐心资本,通过设立根技术探索基金和具有试错容错功能的阶段性资助机制,支持根技术的原创性探索活动。民营科技企业是市场经济的活跃分子,有助于推动创新型经济和根产业发展,政策制定者应完善制度设计,帮助民营科技企业发挥优势,在根技术的培育过程中依法平等获取创新要素。

(三) 研究局限与展望

本文的研究仍存在以下局限及今后研究方向:一是样本和分析资料主要来源于中国大陆及美国等科技发达国家,跨国跨文化的适用性需要进一步验证;二是对根技术进行主题建模的数据资料主要来源于信息技术领域,未来对其他行业

情况可开展补充分析;三是研究未对根技术的强弱程度进行区分考虑,未来可结合面板数据或事件史方法探讨“弱根—中根—强根”的转化机制,挖掘情境因素对根技术强弱的影响;四是未来可采用长周期的案例纵向研究,揭示根技术从种子期到泛在期的演化规律、驱动机制和演化路径,特别是深入探索从根技术到根产业的形成规律和路径,挖掘根技术对根产业施加的前向效应、后向效应与旁侧效应。

参考文献:

- [1] 房汉廷. 根技术及其全生命周期解构[J]. 中国软科学, 2025(3): 1-19.
- [2] 施必翔, 陈劲, 李亚东, 等. 根技术视角下关键核心技术动态演化路径研究:以芯片光刻技术为例[J/OL]. 科学学研究, 1-20 [2025-09-29]. <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20250507.007>.
- [3] 房汉廷. 着力发现和培育根技术、根产业[J]. 科技中国, 2024(3): 14-16.
- [4] 刘越山. 根技术与根产业亟待创新——访科技部研究员、中国科技发展研究院原副院长房汉廷[J]. 经济, 2021(11): 42-44.
- [5] 魏际刚. 应重视从战略高度推动人工智能根技术发展[J]. 审计观察, 2021(9): 6-11.
- [6] 翟万江. 铸就工业互联网“根”技术 实现工业智能化关键跨越:北京东土科技股份有限公司[J]. 中国科技产业, 2024(3): 52-54.
- [7] 李周羲. 天府兴隆湖实验室“根技术”激发成渝电子信息产业向“新”力[J]. 产城, 2024(4): 44-45.
- [8] 张楠. 立足“根技术”构建数字经济坚实底座[J]. 软件和集成电路, 2023(5): 32-33.
- [9] 盖贝贝. 国产软件根技术发展路在何方? [J]. 通信世界, 2023(12): 6-7.
- [10] TIERNEY R, HERMINA W, WALSH S. The pharmaceutical technology landscape: a new form of technology roadmapping[J]. Technological forecasting and social change, 2013, 80(2): 194-211.
- [11] BAE S, HEO Y M, YOON G S. Digitalization of root technology using knowledge management system[J]. Design and manufacturing, 2015, 9(2): 6-9.
- [12] HAN J, CHO K. Emerging industrial root technologies: a structural topic model-and topic matrix analysis-based approach [J]. Asian journal of technology innovation, 2022, 30(1): 178-197.
- [13] 姜南, 韩琦. 美西方对华专利遏压与渗透:动因、举措

与风险防控[J]. 中国科技论坛, 2025(4): 140-150.

[14] 吕越. 我国产业链供应链韧性的风险防范与新质生产力赋能的机制路径[J]. 学术论坛, 2025, 48(1): 25-37.

[15] TUKAMUHABWA B R, STEVENSON M, BUSBY J, et al. Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study [J]. International journal of production research, 2015, 53(18): 5592-5623.

[16] 崔维军, 孙成, 吴杰, 等. 高价值专利对企业技术标准能力的影响研究[J]. 科学学研究, 2023, 41(2): 296-306.

[17] BINZ M, AKATA E, BETHGE M, et al. A foundation model to predict and capture human cognition [J]. Nature, 2025(644): 1002-1009.

[18] 朝晖. DeepSeek 创始人梁文锋: 中国 AI 不可能永远跟随 必然有人站到技术的前沿 [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-09-01]. <https://news.mydrivers.com/1/1027/1027720.htm>.

[19] 胡含嫣. 黄仁勋的新逻辑: 从“卖铲人”到“全球 AI 基建运营商” [EB/OL]. (2025-05-20) [2025-09-01]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_30841816.

[20] 覃敏. 任正非: 第四次工业革命基础是大算力 [EB/OL]. (2023-09-20) [2025-09-01]. <https://m.caixin.com/m/2023-09-20/102110489.html>.

[21] 吴蔚. 华为数据库: 在根技术上保障数据 [EB/OL]. (2023-06-12) [2025-09-01]. http://dz.jjckb.cn/www/pages/webpage2009/html/2023-06/12/content_93110.htm.

[22] 胡健, 陈家兴. 国家越开放, 会促使我们更加进步: 对话任正非 [J]. 中国经济周刊, 2025(11): 38-40.

[23] 华尔街见闻. 对话幻方梁文锋: AI 界的拼多多: 揭秘 DeepSeek! [EB/OL]. (2024-07-18) [2025-09-01]. <https://wallstreetcn.com/articles/3719982>.

[24] U. S. Department of Energy. The history of the light bulb [R]. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 2013.

[25] 黄玉叶. 华为鸿蒙 OS 正式发布: 鸿蒙夭夭, 灼灼其华 [EB/OL]. (2019-08-12) [2025-09-01]. https://www.ebdio.com/BigData/2019-08/12/content_6150331.htm.

[26] ROSTOW W W. The take-off into self-sustained growth [J]. The economic journal, 1956, 66(261): 25-48.

[27] BARNEY J. Firm resources and sustained competitive advantage [J]. Journal of management, 1991, 17(1): 99-120.

[28] BARNEY J B. Looking inside for competitive advantage [J]. Academy of management perspectives, 1995, 9(4): 49-61.

[29] BARNEY J B. Is the resource-based “view” a useful perspective for strategic management research? Yes [J]. Academy of management review, 2001, 26(1): 41-56.

[30] PRIEM R L, BUTLER J E. Is the resource-based “view” a useful perspective for strategic management research? [J]. Academy of management review, 2001, 26(1): 22-40.

[31] PETERAF M A, BARNEY J B. Unraveling the resource-based tangle [J]. Managerial and decision economics, 2003, 24(4): 309-323.

[32] RAJESH R. Technological capabilities and supply chain resilience of firms: a relational analysis using Total Interpretive Structural Modeling (TISM) [J]. Technological forecasting and social change, 2017, 118: 161-169.

[33] BELHADI A, KAMBLE S S, VENKATESH M, et al. Building supply chain resilience and efficiency through additive manufacturing: an ambidextrous perspective on the dynamic capability view [J]. International journal of production economics, 2022, 249: 108516.

[34] BAZ J E, RUEL S. Can supply chain risk management practices mitigate the disruption impacts on supply chains’ resilience and robustness? evidence from an empirical survey in a COVID-19 outbreak era [J]. International journal of production economics, 2021, 233: 107972.

[35] 马潇宇, 黄明珠, 杨朦晰. 供应链韧性影响因素研究: 基于 SEM 与 fsQCA 方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(9): 2484-2501.

[36] SABAHI S, PARAST M M. Firm innovation and supply chain resilience: a dynamic capability perspective [J]. International journal of logistics research and applications, 2020, 23(3): 254-269.

[37] QI Y, WANG X, ZHANG M, et al. Developing supply chain resilience through integration: an empirical study on an e-commerce platform [J]. Journal of operations management, 2023, 69(3): 477-496.

[38] KIM S H, FOWLER J W, SHUNK D L, et al. Improving the push-pull strategy in a serial supply chain by a hybrid push-pull control with multiple pulling points [J]. International journal of production research, 2012, 50(19): 5651-5668.

[39] 杨善林, 李霄剑, 莫杭杰, 等. 科技战略供应链的基本特征与关键科学问题 [J]. 中国管理科学, 2025, 33(1): 1-13.

(本文责编: 润泽)