

引用格式: 刘安蓉, 陈悦, 吴滨, 等. 颠覆性技术从边缘力量如何成为未来主流? ——基于技术-应用-生态的视角[J]. 技术经济, 2024, 43(7): 110-124.

LIU Anrong, CGEN Yue, WU Bin, et al. How disruptive technology evolves from marginal presence to dominant future force?: Based on a technology-application-ecology perspective[J]. Journal of Technology Economics, 2024, 43(6): 110-124.

颠覆性技术从边缘力量如何成为未来主流?

——基于技术-应用-生态的视角

刘安蓉¹, 陈悦², 吴滨³, 曹晓阳⁴, 韦结余³

(1. 中国工程物理研究院科技信息中心, 绵阳 621900; 2. 大连理工大学科学学与科技管理研究所, 大连 116024;

3. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100094; 4. 中国工程科技创新战略研究院, 北京 100089)

摘要: 颠覆性技术会对主流技术轨道以及行业市场格局乃至国际竞争规则产生颠覆性效果, 如何从边缘力量成为未来主流, 对于科技自立自强具有现实意义。基于创新理论构建技术-应用-生态(TAE)框架, 对颠覆性技术的演化路径及其作用机制进行分析。研究表明, 颠覆性技术由边缘力量到未来主流是一个系统变革, 具有由萌生→丛生→递归的技术生成动态演化轨迹、由初始场景→中阶场景→目标场景→未来场景的应用跃迁路径, 以及树状→环状→网状的创新生态变革过程, 并受到技术的融合发展、技术-应用的深层互动, 以及后发优势动态转换的竞争机制等综合作用, 从边缘力量到未来主流存在技术分叉、应用跃迁、生态协同三大后发优势转换的临界条件。最后从重视技术科学、加强需求侧管理、优化创新生态、把握政策时机等方面得到政策启示。

关键词: 颠覆性技术; 技术-应用-生态(TAE); 边缘力量; 未来主流

中图分类号: F270 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2024)07-0110-15

DOI: 10.12404/j.issn.1002-980X.J24011805

一、引言

颠覆性技术会对主流技术轨道以及行业市场格局乃至国际竞争规则产生颠覆性效果, 已上升为国家战略之重。2024年6月召开的全国科技大会、国家科学技术奖励大会、两院院士大会上指出, “拥有强大的基础研究和原始创新能力, 持续产出重大原创性、颠覆性科技成果, 是建成科技强国必须具备的一项基本要素。当前, 面对全球经济版图的技术锁定、产业垄断、格局既定, 亟待通过颠覆性技术变革解决“断链”“脱钩”和“卡脖子”问题实现换道自强。历史上打破先进国家产业锁定的, 都是开辟新的技术轨道, 抓住产业未来主流技术机遇, “另辟蹊径”培育未来颠覆性技术换道制胜。科学技术史表明, 历次工业革命涌现的蒸汽机技术、电力技术、计算机技术、半导体技术、互联网技术等重大颠覆性技术的创新并非一蹴而就, 而是经历漫长的科学发现与传播、技术发明与应用、产业形成与锁定过程, 每一个重大颠覆性技术的发明者往往不是最终的颠覆者, 参与的企业、国家此起彼伏, 后起之秀浪潮式涌现, 推动重大颠覆性技术从边缘力量的兴起到成为下一个主流。京东方、比亚迪等越来越多的企业把颠覆性技术作为一项应用性、竞争性的战略工具, 从边缘力量成长为新一代的主流, 创造了颠覆者的神话。那么, 颠覆性技术由边缘力量如何成为未来主流? 这个问题的研究, 对于在新一轮颠覆性技术浪潮中重塑格局后发居上, 具有现实意义。

收稿日期: 2024-01-18

基金项目: 中国工程院咨询研究项目“重大颠覆性技术发展若干重大问题研究”(2021-HYZD-13)

作者简介: 刘安蓉, 硕士, 中国工程物理研究院科技信息中心正高级经济师, 研究方向: 颠覆性技术创新与科技评估; 陈悦, 博士, 大连理工大学科学学与科技管理研究所教授, 博士研究生导师, 研究方向: 科学学理论、科学计量学、科技创新管理; 吴滨, 博士, 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所研究员, 博士研究生导师, 研究方向: 技术经济; (通信作者) 曹晓阳, 硕士, 中国工程科技创新战略研究院颠覆性技术战略研究中心主任, 副研究员, 研究方向: 颠覆性技术创新与科技安全; 韦结余, 博士, 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所助理研究员, 研究方向: 数字经济与技术创新。

二、理论依据

(一) 颠覆性技术的内涵与特征

哈佛大学教授克莱顿·克里斯坦森定义颠覆性技术为以意想不到的方式取代现有主流技术的技术,认为“它们往往从低端或边缘市场切入,以简单、方便、便宜为初始阶段特征,随着性能与功能的不断改进与完善,最终取代已有技术,开辟出新市场,形成新的价值体系”^[1]。表现在过程上就是从边缘切入并成功取代现有主流技术的动态演化。因此,颠覆性技术是“当下的边缘力量,未来的主流技术”,它具有强大的破坏性,能以革命性方式对应用领域产生“归零效应”,重构应用领域的体系和秩序,并由此改变人们的生活、工作方式和作战方式,是推动人类经济社会变革的根本性力量^[2]。

颠覆性技术作为效果定义的一类技术,从现有格局边缘力量成为未来主流的动态演化过程,能够产生重大的颠覆性效果,立足战略视角可以概括为三个方面:一是归零效应。颠覆性技术取代现有主流技术,原有主导产业的技术、规则、资产等在相同功能上失去了使用价值,不能再继续作为主要的技术方法或工具得到市场或社会的采用,在使用价值上归零。二是重塑格局。颠覆性技术取代现有主流技术的结果是战略性的、全局性的、体系性的变革,改变现有的体系结构和秩序,使社会经济范式在宏观图景上发生本质的变化。三是未来主流。颠覆性技术首先破坏了现有技术的价值体系,同时也从边缘力量出发,通过与现有主流技术的竞争博弈,逐步替代并可能催生新的未来主流的技术价值体系。颠覆性技术反映了:“技术演进的非连续性”和“未来主流的不确定性”两大本质问题,前者让在已有技术轨道上建立的认知、方法、经验等面临技术变轨时失效;而后者极为复杂,众多边缘力量通过“竞争”和“适配”才能成为未来主流^[3]。

(二) 文献回顾

颠覆性技术由边缘力量到未来主流是一个技术演进与创新扩散的过程。技术演进轨迹理论认为技术创新是沿着某种特定路径的创新,颠覆性技术的演化遵循技术创新的基本规律,是技术和经济要素综合影响下的技术演化轨迹^[4]。从创新扩散的角度来看,Leifer等^[5]基于演化经济学“遗传-变异-选择”理论,从技术研究、知识物化、产品成型和市场实现等阶段构建了颠覆性技术创新过程模型,通过要素价值形态的变化反映技术的成长。Christensen^[1]认为颠覆性技术的产生与演化是通过轨道的转换,新技术满足新市场和利基市场的需求,从根本上造成对主流市场的破坏,逐步由新市场或边缘市场向主流市场扩散并完成对市场的重大影响,进而将颠覆性技术的创新扩散过程归纳为“非主流市场—技术积累—主流市场”的流程,后发企业实现颠覆性创新需要经历“新市场进入/低端市场(进入)—产品性能提升(追赶/迭代)—主流市场颠覆(颠覆/破坏)”等过程阶段^[6]。由于市场侵入方向的不同,学者进一步提出了不同的演化过程。Schmidt和Druehl^[7]提出分离市场低端入侵的扩散模式,即基于分离市场,首先侵蚀主流低端市场,然后向上扩散至高端市场。周洋和张庆普^[8]提出依托于技术突破从高端分离市场进入市场,遵循自上而下的高端颠覆性创新市场扩散路径。刘海兵等^[9]提出了数字技术驱动高端颠覆性创新的理论框架,发现高端颠覆性创新产生过程包括模糊前端阶段、开发阶段、商业化阶段等三个核心阶段的核心创新活动,数字技术通过数字连通和数字协同两类机制驱动高端颠覆性创新的产生。在这些创新扩散的过程中,后发企业通过产品性能的提升在新市场快速占领市场份额并逐步挤占主流市场空间,最终导致新兴市场对主流市场的颠覆,其演化过程经历了机会识别、价值网络重构、主流市场破坏等三个过程^[10]。

技术演化的研究目的在于技术识别,学者们应用文献计量方法从较为客观的角度对颠覆性技术演化进行了研究。黄鲁成等^[11]以专利数据为依据,借鉴物种入侵模型和集对分析方法,基于SOM的物种入侵模型来反映颠覆性技术的演化路径。李欣等^[12]利用文献、专利以及语义分析等多源数据揭示颠覆性技术演化轨迹,从技术性能渐进脉络和变化规律性特征来反映技术的演进。于光辉等^[13]利用专利引用信息和Bass模型对颠覆性技术的市场特征与扩散规律进行了研究,利用美国专利数据验证了薄膜电池发电是一项颠覆性技术,其技术扩散呈现典型的S型轨迹。刘云等^[14]利用引文网络分析方法,构建了基于网络论文重要性的技术颠覆性程度测度模型,从颠覆性程度、三方组分析、网络特征和路径特征4个角度对颠覆性技术的发展路径进行了测度研究。单晓红等^[15]基于颠覆性技术的“突变性”和“融合性”特征,通过引入技术主题时

序共现网络和主题引用网络,对主题间的演化趋势和演化形式进行判别。科学大数据正在成为开展颠覆性技术演化研究的新型驱动力,刘博文和白如江^[16]运用主题识别、深度学习、网络分析、可视化分析等技术对干细胞治疗技术进行了演化分析,并归纳出技术发展的滞后性、复合性、突变性、扩张性4个演化特征。

其他视角如基于技术-组织-环境(TOE) 的角度,张光宇等^[17]采用扎根理论对人工智能行业技术群落演化以及市场交互过程进行分析,提炼出技术范式转变、组织动态演化和价值网络创新等核心范畴,构建了人工智能颠覆性技术演化路径的理论模型。张玉磊^[18]认为颠覆性创新演化的实现通过技术生态、平台生态和集群生态等相关因素的组合,对新技术进行功能上的再定义和再组合,满足主流用户需求基础上边缘价值的实现,从而有效提升优势获取能力,通过能力构建、资源整合和组织学习的聚合进一步促进颠覆性创新演化的实现。基于战略生态位(SNM) 的角度,许泽浩等^[19]解释了颠覆性创新从技术-市场-范式的发展路径,认为颠覆性技术的演进包括技术选择、实验选择、实验实施、新兴主导技术(实验扩大) 与新的技术系统5个步骤。黄子洋等^[20]揭示了不同的生态位阶段主导创新生态系统构建的架构者特征。基于创新生态系统的视角,邵云飞等^[21]通过剖析关系嵌入与组织合作如何在突破性创新不同阶段进行动态适配的机理,归纳了突破性创新生态系统持续演化形态与实现机制。鲍萌萌^[22]总结创新生态系统中技术依存关系与价值采用主张变化规律,提出三种颠覆性创新过程模型。李东红等^[23]认为跨界网络驱动的颠覆性技术创新由技术网络丰富、市场网络丰富和两个网络的价值共创的继起性演进,并且在不同阶段治理措施的选择会影响到创新结果。基于商业模式的视角,尚甜甜等^[24]认为颠覆性创新与商业模式在演进过程中呈现静态适配及动态协同演化关系,经历了技术集成、技术调整以及技术升级三个阶段,产生的颠覆性效果遵循开辟新市场—侵蚀主流低端市场—侵蚀主流高端市场的路径。

(三) 评述与研究框架

综而观之,上述颠覆性技术的创新演化包含从单一要素到技术-市场、技术-商业模式、技术-组织-环境、技术-市场-范式等多层次融合,理论认识的不断深化为本文提供了丰富的视角、思路与理论依据。由于颠覆性技术由边缘力量成为未来主流是一个长期演进、动态博弈的创新过程,颠覆性技术作为一个新兴的技术物种,其替代现有主流技术的过程,既包含技术供给侧的技术生成,也包含市场需求侧技术如何实现与应用的结合,以及从外部环境来看技术如何通过作用于创新生态系统的变革实现格局重塑等一系列的复杂演化。这是一个从技术、应用、生态等关键维度对颠覆性技术由边缘到主流的系统变革过程,受到多重因素联合作用和多方因素组合协同互动,但目前少有研究。颠覆性技术具有技术的自然属性,技术属性是颠覆性技术形成并得以发展的基础,颠覆性技术的演化,就是反映其如何从技术物种的萌生发展成为创造新行业或改变老行业的成熟技术,这是一个创新的过程。创新的本质在于技术与应用的结合,应用催生技术的分叉、二次开发以及转移扩散,是促成颠覆性技术向产品产业转化的内在因素。颠覆性技术只有在应用过程中才会产生新产品、新市场或者新场景,逐渐完成对现有主流技术的替代。技术的演化如何与应用相结合进而反映应用场景演化与实现机制的理论建构与探索性研究相对缺乏。另外,颠覆性技术所面临的管理冲突,其实质是颠覆性技术社会属性的反映,技术的发展依赖于技术及其创新活动所处的微生环境以及生态系统^[25],同时技术的变革过程又会影响和重塑整个创新生态。因此,颠覆性技术由边缘到主流会受到技术的生成、应用的选择以及生态环境的变化等诸多因素的组态影响,直接参与到颠覆性技术的演化,构成内因与外因综合作用的复杂系统。为此,构建技术-应用-生态(technology-application-ecosystem, TAE) 分析框架,内外视角相结合,从微观到宏观深入到颠覆性技术演化的结构与过程,以期揭示颠覆性技术如何由一个技术的点,在技术演化、应用选择与生态协同的综合作用下,实现由边缘到主流的系统变革,具有理论价值和政策指导意义。

三、TAE: 颠覆性技术由边缘力量到未来主流的路径分析

颠覆性技术由现有格局的边缘力量成为未来主流,是一个长期演进、动态博弈的创新过程,在这个过程中,科学的发现与传播、技术的发明与应用、产业的形成与锁定,表现为科学、技术、工程、产业的迭代转化互促^[26],其路径发展具有高度的复杂性,是一个系统的变革。

(一) 颠覆性技术具有由萌生→丛生→递归的动态演化轨迹

技术的演化是描绘技术体系的矛盾运动中各分支技术产生、兴起、消亡的动态发展过程,具有连续性动

态演变的轨迹^[27]。颠覆性技术作为一类技术的统称,技术为其内在的自然属性,以技术体系的方式呈现,其生成与发展受技术体系的矛盾运动规制,在演化形态上大致经历“单一、离散-连续、无序-有序、递归”的变化,呈现由萌生、丛生到递归的发展阶段。不同阶段技术体系表现出不同的矛盾运动特点。① 技术萌生期。新的科学原理突破将产生以原有性能跃升或新功能出现为特征的根技术萌芽,根技术形态比较单一,技术结构呈现离散、不连续状态,以自组织的技术发育与技术选择为主,与应用领域尚未形成直接交互。② 技术丛生期。根技术与其他技术之间植入、融合、裂变的选择和协同等作用开始分叉,形成多个分支技术(技术前沿);分支技术与应用领域产生交互,技术选择与市场选择的试错迭代作用逐步突显,技术功能增加,技术结构趋于复杂、连续。③ 技术递归期。大量分支技术经过创新的竞争和适配,开始收敛形成较为明确的技术轨道,主导型技术出现;技术本身开始融合,技术复杂度增加,技术形态趋于简单,技术趋于成熟推动大规模的应用扩散,形成产业锁定^[28]。上述动态演化轨迹分析表明,颠覆性技术由新兴前沿的边缘力量成为未来主流是一个由萌芽到发散再到收敛的过程。

以人工智能技术为例,人工智能技术的动态演化,技术体系及其子域的发展是在若干技术单元(亦或子域)的融合下演化发展而成。采用动态技术主题模型方法对人工智能技术专利进行主题挖掘,并以动态方式展现整个技术领域宏观演进特征。运用绘图软件 RAWgraphs 将人工智能的技术主题进行可视化展示,刻画出每一个分支领域技术生命周期动态轨迹(图 1^①),显示了“计算机视觉”“机器学习”“语音技术”“数据挖掘”和“自然语言处理”5 个技术主题的 185 个技术主题词的演变状况。其中,横坐标表征时间切片(一年作为一个切片),纵坐标表征技术特征词的概率分布。每一条不同灰度的色带代表一个技术主题,色带的幅度表示该技术主题在当年的热度(与当年该技术主题下的专利数量呈正相关),各技术主题在每一年份中按照其热度进行从上往下的排序排列。

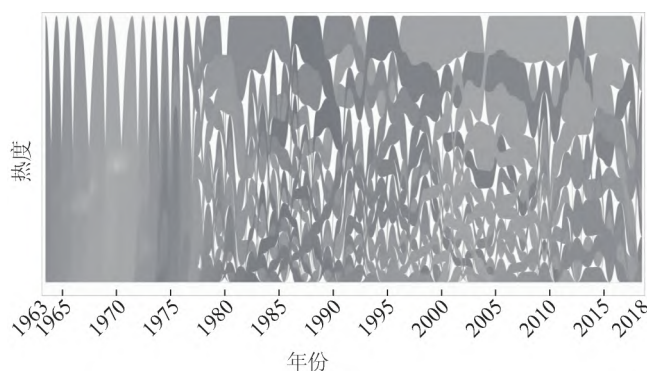


图 1 人工智能领域技术主题演变趋势图
(1963—2018 年)

图 1 表明,人工智能领域技术主题经历了技术主题萌生、技术主题丛生和技术主题递归的三个发展阶段,大致呈现从“点”到“线”到“面”演变特点。① 人工智能技术的萌生期(1963—1976 年)。1963—1976 年每年的人工智能技术主题差异性很大且单一,即“点”状发展,相互间关联度低,这是人工智能技术的萌生阶段,见图 2^②(a)。② 人工智能技术的丛生期(1977—2006 年)。1977—2006 年,人工智能主题技术主题增多且表现出一定的连续无序的涨落。这种丛生是域内技术主题与域外技术主题的融合或内部形成的分支,这时呈现出“线”性演变状态,见图 2(b)。③ 人工智能技术的递归期(2007 年至今)。2007 年至今在大数据和深度神经网络的驱动下人工智能技术主题趋于递归,即主题数量减少,主导性增强,是最初技术主题萌芽时期的某种递归,或许酝酿着新一轮的技术主题丛生,见图 2(c)。可以发现,人工智能技术发展过程并不是线性的,而是分阶段长期演进的过程,这个过程充满曲折艰辛以及不确定性。科学新原理的发现与传播、新技术的发明与分叉、不同领域技术的融合以及辅助技术与支撑技术的革新等都影响了人工智能技术的颠覆历程。

(二) 颠覆性技术由边缘到主流呈现初始场景→中阶场景→目标场景→未来场景的应用跃迁

近年来人工智能、大数据、物联网、区块链、5G、元宇宙等颠覆性技术概念相继成为年度热词,但能否找到广泛应用场景成为现实难题。技术的演进形态并非仅仅是在技术体系的矛盾运动中以内驱自主性前进,社会需求以技术的应用落地扮演了对技术选择的动力来源,两者的共同作用决定着技术的进化形式。颠覆性技术通过技术与场景的对接实现应用落地,从而使颠覆性技术体系的进化得以延续,并通过技术的转化和

① 具体数据及相关描述备索。

② 具体数据及相关描述备索。

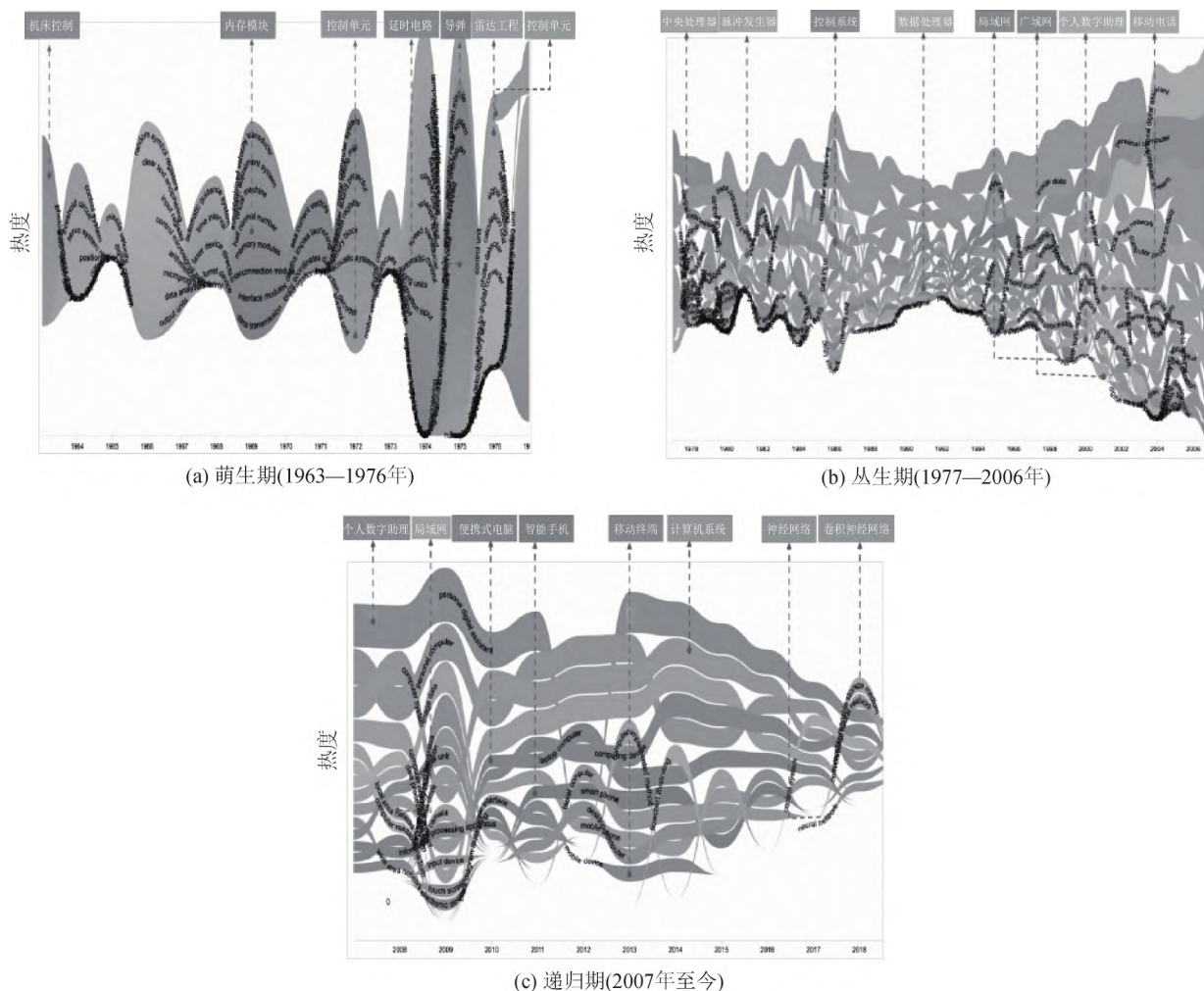


图 2 人工智能的技术主题演化图谱

应用创造重大价值突破^[29],由非主流市场逐步向主流市场扩散并成为新的主流技术。而由非主流市场到主流市场的应用场景是不断发展转换的,市场的变化以应用场景的变化为表现,细分市场将技术与应用场景结合实现产品化,不同发展阶段的技术结构性能不断与场景需求匹配对接^[30],通过满足不同细分市场的需求推动技术改进,进而完成颠覆性创新的价值实现,由此形成了技术-应用演化的路径。

从生命周期考察技术-应用演化路径,可简单描述为:一项颠覆性技术的萌芽创生,其技术性能与规模化能力均不如现有主流技术,面临巨大的生存压力。为此首先切入边缘市场寻找技术性能可以匹配的现实场景,找到实用化的应用场景之后,技术端根据场景需求进行调整,从而获得技术改进的机会,使技术形态与性能表现得到发展,进而不断寻找或开发与之适配的应用场景,利用场景促使技术提供的功能与用户需求体验更好地匹配。伴随技术发展和性能提升,面向应用场景与技术实现的耦合需求,应用场景由设想的目标虚拟形式向现实存在的利基形式转化,使颠覆性技术在生成与发展过程中产生不同阶段的突破性产品应用,从而也具有层级跃迁的状态,由边缘的应用场景向主流的应用场景扩展,呈现出初始场景→中阶场景→目标场景→未来场景的应用跃迁脉络,持续由弱应用→中应用→强应用→超应用实现向主流目标场景以及意想不到的未来场景发展。这个过程通过技术-应用交互迭代式的发散、收敛,使得颠覆性技术在不同发展阶段能够持续转化为不同技术形态的突破性产品创新,形成技术生成与发展的应用演化路径。

第一阶段:初始场景实用。颠覆性技术基于新的技术轨道发展,由元技术融合形成的初始技术比较粗糙,其技术性能水平不能满足主流的市场需求,需要主动撕开市场在低(高)端或新市场等边缘地带寻求与应用场景对接转化为实用化产品。通过场景搜索和试错,初始技术在分离的或边缘的利基市场需求中找到

合适的应用场景,从而产生初始应用爆发。其特征量为“初始技术+分离/边缘(利基)市场”。

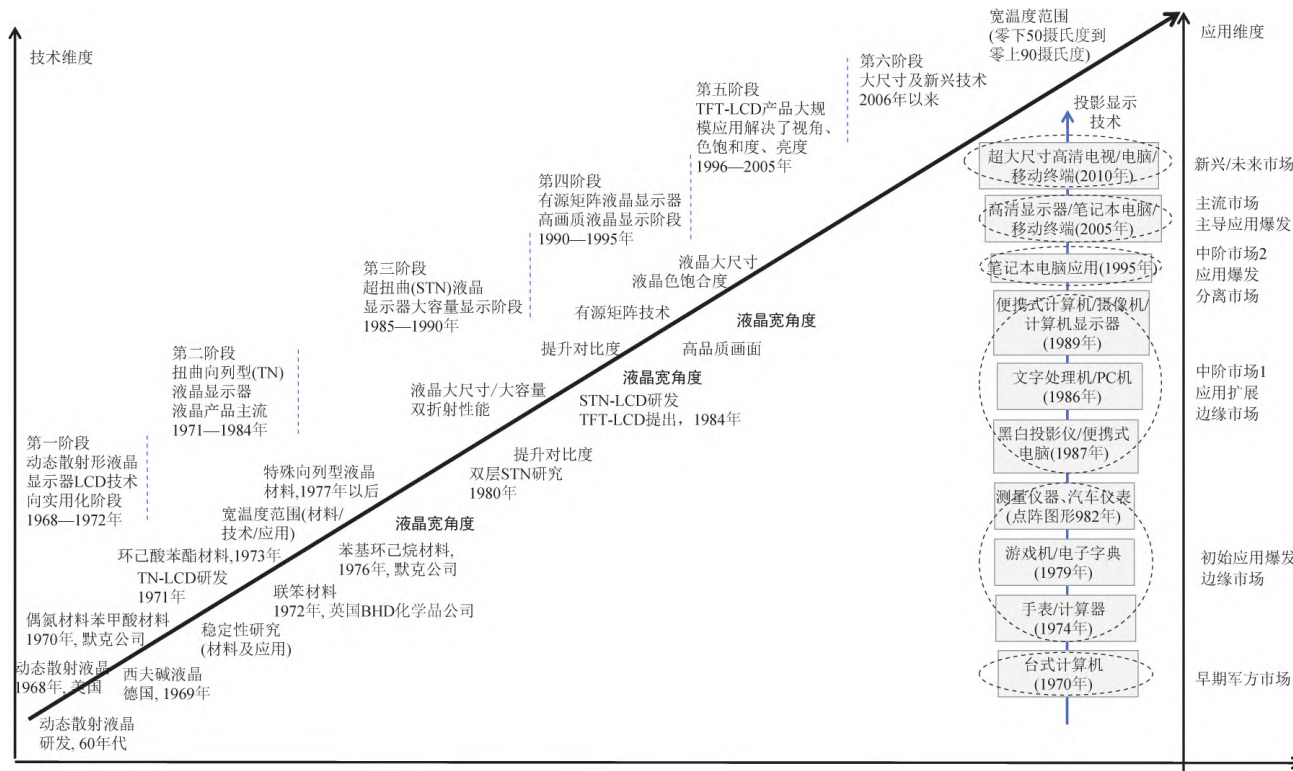
第二阶段:中阶场景发展。颠覆性技术伴随二次技术分叉,技术性能得到改进,但离主流市场需求仍有差距,需要在非主流市场通过对接新的应用场景,与应用需求侧的成熟技术进行融合,形成较高水平的技术组态,产生较高水平的突破性产品创新,实现从边缘到主流过程中形成中间过渡性的突破性应用,其特征量为“分支技术+分离/边缘(中阶)市场”。技术形态发展在不断提升技术性能的进程中,不同阶段搜索匹配可对接的应用场景,对应产生各阶段中间场景的应用爆发。

第三阶段:目标场景实现。颠覆性技术形成主导技术的技术系统,核心技术性能具备对接主流场景需求水平,通过入侵主流市场,进而完成颠覆性创新,实现对在位技术的主流替代以及主流应用爆发。其特征量为“主导技术+主流(目标)市场”。

第四阶段:未来场景引领。颠覆性技术成为主流技术后,针对当前新兴的或设想的未来应用场景,一般通过主导技术的突破创造新的功能,具备对接新兴场景能够在未来实现应用的可能,从而引领或创造未来新兴的市场应用。其特征量为“突破技术+新兴/未来市场”。

以液晶显示(liquid crystal display, LCD)为例。LCD技术的进化一直贯穿着科学、技术、工程的进步,也是一个市场连接和社会接受逐步发生的过程。“挂在墙上的电视”是直接催生液晶显示技术的应用场景需求,并最终推动了这一愿景的实现。LCD发展过程的技术-应用交互演进脉络表明,LCD远景应用是固有的目标需求,但达到目标需求的过程是渐进的,从最原始的技术应用起源于美军方采购,其后经历初始技术-实用化应用爆发、中间技术-规模化应用爆发、主导技术-主流化应用爆发、突破技术-新型化应用爆发四次大的阶跃。

图3表明,颠覆性技术由边缘到主流遵循“非主流市场-技术积累-主流市场”的演化过程,通常是首先迎合远离主流市场的边缘市场应用需求,经过技术-应用的累积作用,进一步进行多轮次中阶市场的应用场景的迁移,进而最终上迁至主流市场的场景应用。可以看到,应用浪潮的迭代与每一次技术突破开辟的性能改进与功能产品化密切相关。技术的优劣是由其呈现的功能指标来衡量的,随着技术的进步,技术的性能不断完善,所能实现的功能也越来越优异、多维,为应用场景的扩展提供了物理条件。颠覆性技术的应



TFT-LCD 为“薄膜晶体管液晶显示器”;TN-LCD 为“扭曲向列型液晶显示器”;STN 为“超扭曲向列型”;STN-LCD 为“超扭曲向列型液晶显示器”

图3 LCD 技术-应用的演化路径示意

用演化路径表明,不同发展阶段的颠覆性技术与合适的应用场景匹配,形成赖以生存的突破性产品创新,通过“目标场景催生新技术→初始场景实用初始技术→中阶场景发展中间技术→目标场景成就主流技术→未来场景引领突破技术”等一系列技术与场景的对接,突显了不同阶段的技术性能搜索可实现应用场景的适配与选择过程,技术应用领域的切换与爆发几乎与每一次技术大的突破保持了同步。一旦每一阶段的技术趋于成熟,同一技术将与不同需求场景进行组合,创造新的技术应用场景,实现系列性产品创新,产生应用的爆发式增长。由此,应用场景的演进由一元向多元扩散,由上一轮的应用饱和向下一个应用爆发迭代,应用的范围由点-面-体纵深发展。

(三) 颠覆性技术创新生态系统呈现由树状→环状→网状结构的价值网络演化路径

颠覆性技术创新是一个多主体参与、多要素协同、多阶段衔接的复杂动态过程,其创新过程不可或缺地植入、衍生并改造创新生态系统,从而形成颠覆性技术的创新生态系统^[31-32]。创新生态系统组成的基本要素是企业、大学、科研院所、政府,物种联结形成群落,物种和群落共生竞合、动态演化,形成系统整体演化。从生态视角解构颠覆性技术的路径生成,是以创新生态为研究对象,研究颠覆性技术发展过程中技术与其生态系统之间的共生演化路径。与自然生态系统类似,创新生态系统具有自组织机制,即在一定条件下,系统内部成员相互作用,自发形成某种结构,从而能够让系统具备必要的功能。颠覆性技术创新的过程也是创新生态系统更替演进的过程,其系统内部结构要素的相互作用无论是创新主体之间的技术依存关系还是共同的价值采用主张,都是一个动态变化的过程。从技术依存关系来看,核心技术轨迹的演化、互补性技术的创新以及基础设施的完善都从不同阶段促进了创新生态系统的整体演进^[33]。

因此,颠覆性技术由边缘到主流过程的复杂性和风险性决定其创新过程需要众多互补性合作企业、高校及科研机构以及领先用户的参与,各创新主体以颠覆性技术为纽带,互利共生,形成动态的创新生态系统。从创新生态来看,颠覆性技术与其生态之间始终处于不断调适的过程,一方面颠覆性技术的路径演化寻求适宜的生态;另一方面生态通过调适自身环境加以匹配,伴随颠覆性技术的演化,其创新生态也表现出演化的动态特点。在这个过程中,颠覆性技术自身的演进参与到由边缘到主流的价值网络重组呈现从点起步,由树状→环状→网状的形态跃迁^[21]。从生命周期考察创新生态系统演化路径简单描述为:

科学突破阶段。从点起步,颠覆性技术处于基础性研究寻求原理突破,技术研发者积极寻求外围的合作,与相关科研机构、企业、高校等开始建立联系,以研发群落为主体,尚未出现核心企业,利益相关者联系不紧密。该阶段创新生态系统创新主体较少、规模较小、结构简单,呈小、散、点为特点的孤岛现象。

技术分叉阶段。技术发散路线众多,主导型技术尚未形成,研发者积极寻求外围的合作,与相关科研机构、企业、高校等开始建立联系,小生境启动,所提供产品属性较为单一、固定,目标用户群体规模较小、分布较窄。该阶段创新生态系统创新主体增长迅速,利益相关者缓慢集聚,规模较小,结构趋于层次化,聚点成线,呈现树状结构为特点的生态系统。

产业锁定阶段。主导型技术形成,伴随技术发展和应用发展,出现以核心企业为中心,创新主体在技术选择与市场选择的作用下,逐步增强对环境的适应能力,并强化对环境的选择和改造,并加大创新主体之间协同竞争的整合,系统规模迅速扩张。该阶段创新主体外围节点数量增加,企业间资源的流动推动经济从静态优势向动态竞争优势过渡,围绕核心企业呈现群落聚合,连线成面,构建起价值网络的雏形,系统趋于环状结构。

产业成熟阶段。颠覆性技术替代现有技术成为主流,主导技术创新主体的生态位趋于稳定,互补性技术发展趋于活跃,不断吸引互补性主体的参与,系统内部创新系统完成对旧有产业的覆盖,创新主体的生态位基本稳定,系统内部交流频繁,结构的完整提高了价值共创、共享资源的效率,企业间的创新、合作交流能力捍卫了动态竞争难以复制的优势,部分创新主体因企业创新生态系统门槛提高或生态位饱和而无法进入。该阶段围绕核心企业利益相关者进一步集聚,核心或平台型价值网络形成,呈现网状结构。

以我国智能交通创新生态系统为例,智能交通领域创新生态系统的构建建立在核心企业将一个原始创意衍生出一个生态系统的过程。从发展脉络来看,由于基础性原理技术由国外引进,我国主要着眼于技术引进吸收消化后的再创新,形成自主创新的技术突破、技术分叉、产业锁定、产业成熟等阶段^[34]。对应来

看,智能交通在我国的发展可划分为萌芽期、形成期、成长期、爆发期4个阶段。应用智慧芽专利数据库检索,将1993—2022年的专利申请、授权发明共计54022条数据作为分析对象,利用文本挖掘软件ITGINSIGHT,根据专利申请人的关联关系绘制出智能交通技术创新生态网络演化图(图4)及网络关系强度图(图5)。图4表明,在技术突破期创新生态系统中覆盖较少的创新主体,以科研机构 and 高校及个人为主,以点状呈现出明显的创新孤岛。随着智能交通逐步发展,越来越多创新主体加入并形成创新生态网络,技术分叉阶段智能交通创新网络呈现线状连接,产学研开始协同聚集,创新生态系统产生树状结构。产业锁定阶段,创新网络由线状连接到环状连接,创新生态系统的创新种群和创新群落日益复杂,进而构建了网状的创新生态系统。从图5可以看出,华为、腾讯、百度在创新生态网络中的网络节点较大,一方面显示其在创新生态网络中突出的技术研发与专利应用的引领能力;另一方面也凸显三者发挥智能网联平台的重要作用。

综上,颠覆性技术的创新生态演化路径是科学-技术-工程-产业利益相关者由“点到体”“离散到聚合”、简单到复杂的价值网络重组过程,其演化形态可用“点状→树状→环状→网状”四阶段结构描述。其中,“点”代表创新生态系统的起步,对应科学突破阶段;“树状”代表创新生态系统的集聚,对应技术分叉阶段;“环状”代表创新生态系统的扩张,对应产业锁定阶段;“网状”代表创新生态系统的发展,对应产业成熟阶段。颠覆性技术创新生态演化过程主要表现出三个特征:一是创新主体丰富多样化,创新主体结构呈现由小散多向企业或企业平台集中的发展趋势;二是创新环境根据不同阶段技术领域变化政府投资创新需求政策给予同步配置;三是创新机制由市场导向+环境培育→政府布局+市场选择→政府主导+场景驱动→政府引导+市场规制等进行调整,不断适应创新主体与环境的需求,由此实现由边缘到主流的格局重塑^[35]。

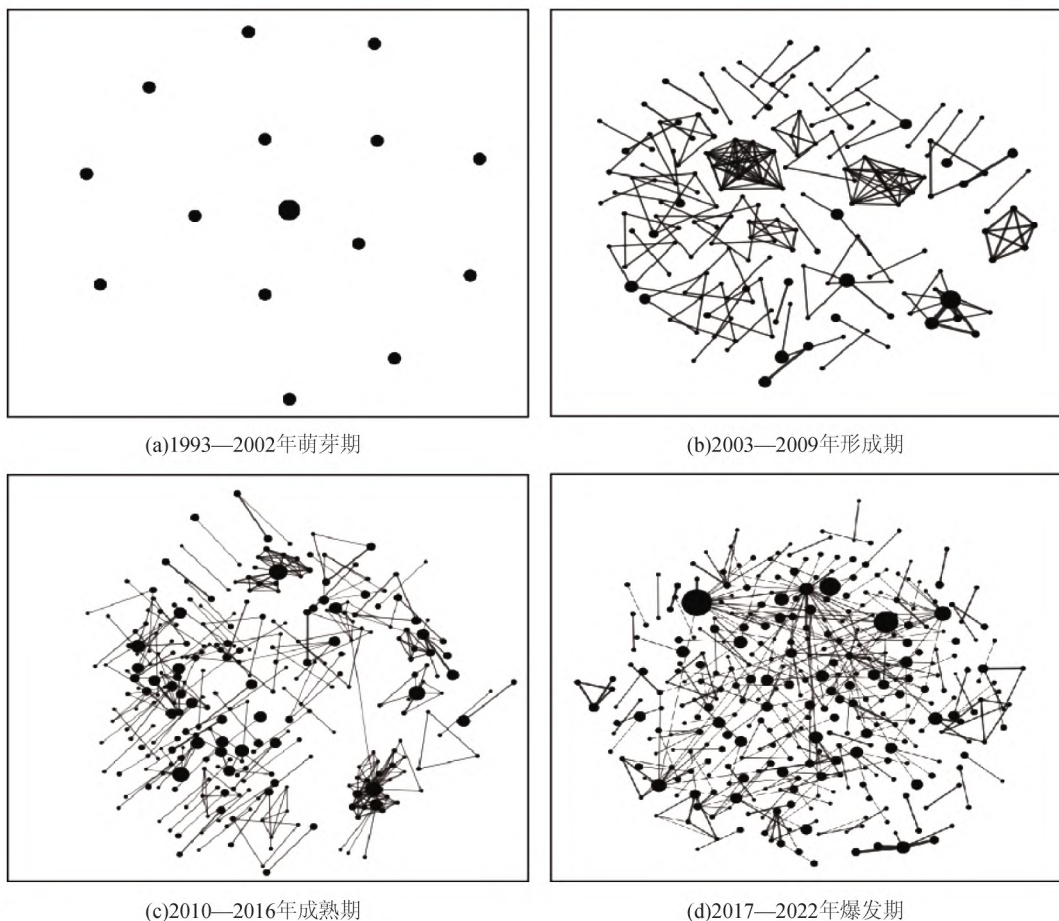


图4 智能交通技术创新生态分阶段演化图谱



图 5 智能交通技术创新生态关系强度图谱

四、颠覆性技术由边缘力量到未来主流的作用机制

颠覆性技术由边缘力量到未来主流的系统变革是一个高度不确定的、非线性的复杂系统工程,其作用机制由技术跨越到组织,涉及技术、创新、竞争三个层次。颠覆性技术本身从自然属性出发遵循技术进化的自然法则,技术实现社会价值的方式在于技术-应用双向选择的创新机制,而颠覆性技术的创新主体通过竞争机制完成创新活动的组织和价值的变现^[36]。

(一) 技术的融合发展机制

融合是技术颠覆性发展的重要机制,技术体系的矛盾运动规制着技术融合。从一般意义上来说,技术产生于对自然现象的应用,通过旧要素的组合形成新要素,技术的发展具有积累和演化的特征,技术发展的轨迹在一定的时空范围内具有前进惯性和方向锁定特性。基于历次工业革命的颠覆性技术宏观逻辑路径(图6)展现了历史上技术体系中先导技术和主导技术的突破引起相关技术的变革,进而发生技术体系的更新变换。以纺织技术、蒸汽动力技术、内燃机技术、控制技术、集成电路技术、生物技术、信息技术等为代表的颠覆性技术,带动先导技术和主导技术的突破变革,最终导致技术体系的变换而显现出颠覆性意义^[37]。

技术发展的颠覆性显现是融合式发展的必然趋势。技术组合演化是技术发展的内在本质,技术在不同领域的扩散和应用,促使技术与技术之间组合在一起发生复合效应构成新技术,现有技术被替代或更新迭代而呈现颠覆性效应^[27]。从技术的生产与发展视角来看,技术呈现体系化发展的趋势,往往早期是依据自然现象而开发的初级技术,数量较少,但随着新的技术需求的出现,技术会组合或融合成新的技术,而原有技术或许被替代,或许仍在独立发展并更新迭代。一般而言,在发展中的技术其生成新兴技术的数量越来越多,而这种组合后形成的指数增长规律也必然导致融合发展而生产的新技术也随之爆发性增长,即呈现颠覆性的效应^[38]。因而颠覆性技术往往是多项技术交叉融合产生的新技术,随着科学技术的飞速发展,学科间交叉渗透进一步加强,技术联系愈发紧密,一种技术的突破往往依赖于其他学科技术的支持,现有技术间的融合成为技术创新的重要形式^[39]。人工智能、区块链、3D打印、工业机器人、定向能等具有颠覆性意义

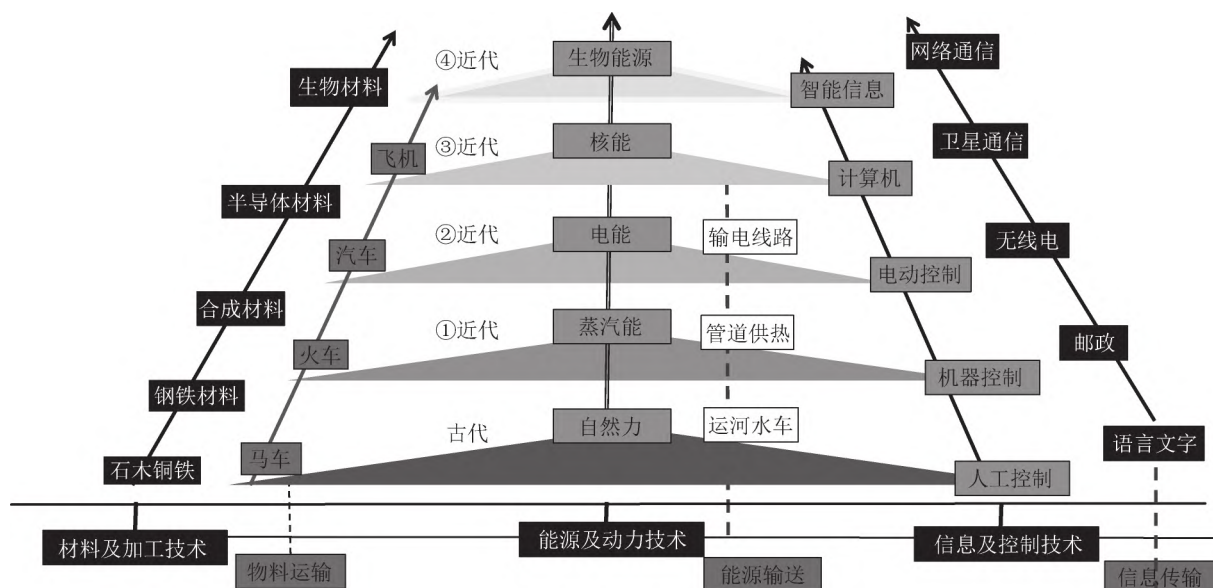


图6 历史上颠覆性技术的宏观逻辑路径

图片来源：现代科学技术与发展导论(第二版)

的技术无不彰显技术融合的重要意义,在科技领域体现了整体与部分的哲学理念,即部分的有机融合能够产生更优的功能。

(二) 技术-应用双向互动的选择机制

颠覆性技术的生成在受激于技术的自组织作用同时,需要搜索可实现的应用需求进行技术的实用化开发,使得技术的内在结构与功能围绕应用场景的具体需求进行匹配,产生技术与应用的互动选择,从而推动颠覆性技术的形成与发展,由边缘走向主流。这是一个不断探索和尝试、学习和试错、发散和收敛的技术-应用循环,由此形成传导-选择迭代机制,推动颠覆性技术的演进。

1. 技术找应用

技术驱动应用的选择机制,即“技术找应用”,是技术搜索应用端结合迭代试错提升性能的过程。在这个过程中,科学突破产生颠覆性根技术在寻求应用方向的可能性中,其分支技术与可实现的应用场景结合,产生初始的新应用,随着分支技术瓶颈不断突破,技术性能逐步提升,应用得到扩展,不同分支技术经过市场竞争选择逐渐涌现出一个主导型技术,伴随技术体系的成熟与大规模生产,最终替代传统技术占据主流应用。这是一个科学-技术-应用的线性模式(图7)。激光技术驱动应用是典型案例。

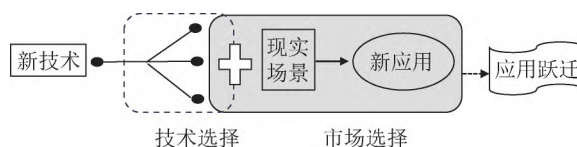


图7 “技术找应用”的技术-应用驱动机制

2. 应用找技术

应用驱动技术的选择机制,即“应用找技术”,是从应用需求侧出发,以应用端的问题或需求为导向,既有搜索合适的技术应用于特定场景提出解决方案的选择,也会基于未来趋势与愿景需求,突破现有技术瓶颈,以颠覆性思想开发全新的颠覆性技术,并在场景实践中实现对技术的迭代选择和发展^[40]。如图8所示,首先基于目标场景搜索可匹配技术,现实技术如有可匹配目标场景的功能需求,则基于功能定义产品进行应用开发形成颠覆性的跨界整合新技术,并通过市场选择技术迭代改进,满足目标场景的性能指标,从而产生颠覆性应用。如果没有现成技术可匹配,则驱动新的原理突破产生全新技术,新技术难以满足目标场景的性能需求,其原型从低端或边缘和现实可用的初始场景结合,形成初始应用,在应用不断扩展升级的刺激下,推动技术循环迭代逐渐趋于目标场景需求,在此基础上技术产生未来的应用跃迁,这是一个双向迭代、深层互动的过程。

基于传统技术是否具备解决问题的条件,应用找技术将产生三种颠覆性技术的选择模式。一是传统技

术不具备可用条件,需要通过重大原理、方法、技术的突破产生新技术来满足应用需求,定义为应用驱动原始创新型模式。二是传统技术一定可用但不完备,需要搜索驱动现有技术进行技术组合、或与新技术融合产生集成创新形成新的技术,定义为应用驱动集成融合型模式。三是传统技术成熟可用,需要驱动界外传统技术进行跨学科、跨领域的技术转移和二次创新,定义为应用驱动跨界整合型模式^[41]。可以看出,应用驱动类型的颠覆性技术创新来源于目标场景的设定,场景的不断跃迁和技术的不断突破,共同完成了颠覆性技术创新的整个过程。在应用驱动技术实现的过程中,嵌套了应用场景对目标技术的选择,这种应用驱动逐渐成为颠覆性技术的主要来源。根据三类应用找技术的可获得性或来源方式,形成不同的应用驱动模式(表 1)。

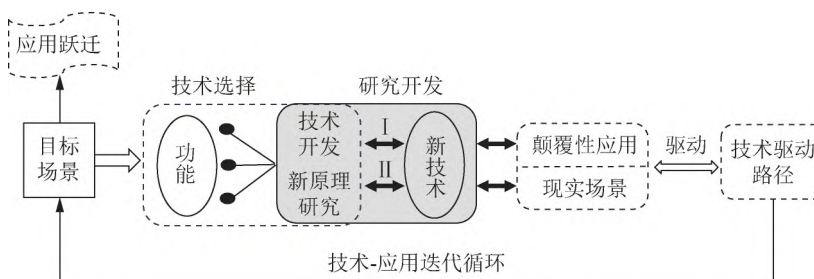


图 8 “应用找技术”的技术-应用驱动机制

表 1 应用驱动技术的选择模式

项目 类型	技术条件	技术形态	应用驱动路径	案例
应用驱动原始创新型	传统技术不具备解决问题的条件	应用为导向驱动科学原理与方法、技术的重大突破,产生从 0-1 的原始创新	需求 功能 科学 技术 场景 产品	阿帕网 青蒿素
应用驱动集成融合型	现有技术具备一定可用条件但不完备	以应用为导向驱动技术组合或与新技术的综合交叉、集成融合创新,产生可用的新技术	需求 功能 场景识别 技术搜索 场景选择 技术组合 场景对接 新技术系统	生物芯片 脑机接口
应用驱动跨界整合型	现有技术成熟可用	将界外技术引入新领域进行跨界应用,通过技术转移、技术集成与二次开发,产生新领域的新技术应用系统	跨界需求搜索 目标场景涉入 现有技术开发 新技术应用系统	坦克 移动支付 固态硬盘

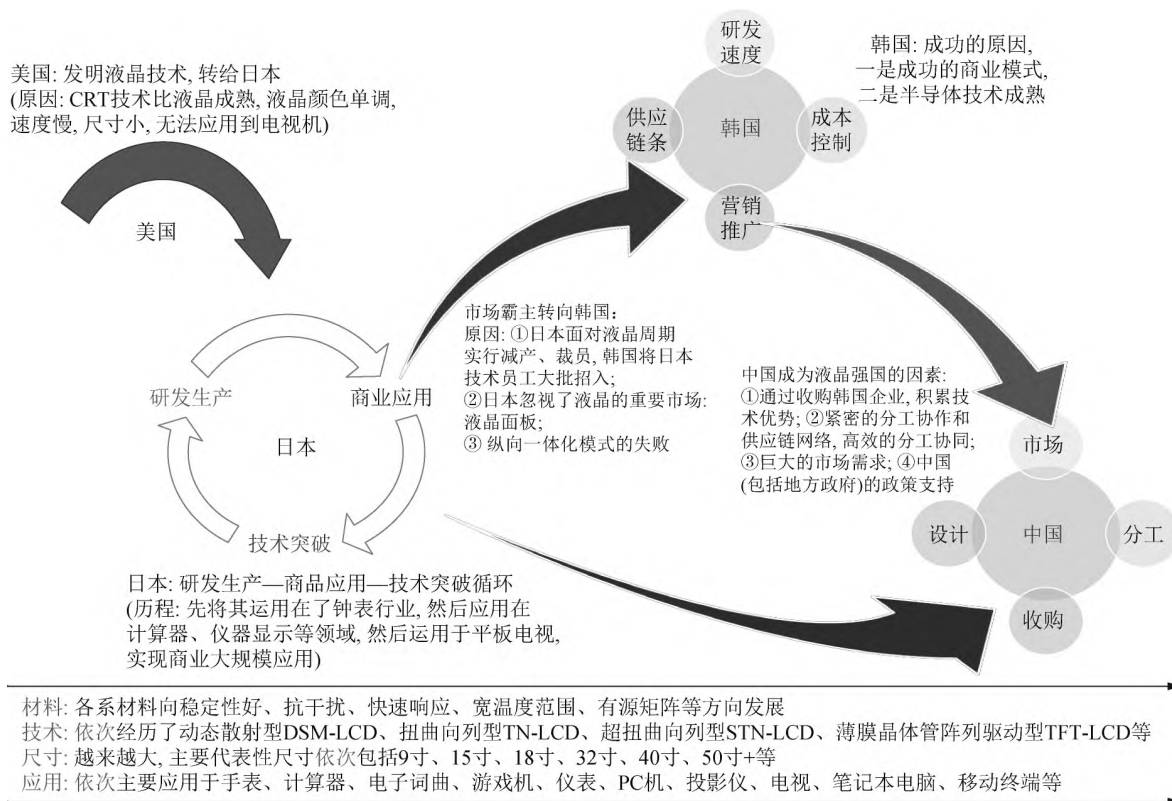
(三) 后发者优劣势转换的竞争机制

颠覆性技术从边缘走到主流的变革过程,是后发者不断涌入持续挑战领先者的动态博弈的过程。在这个过程中,后发者赶超领先者关键在于打破领先者格局,突破领先者的技术势差和遏制锁定,竞争机制贯穿于颠覆性技术从边缘走到主流的演化过程,组织存亡面临极大考验。那么竞争机制是如何撕开领先者铁幕的呢?以 LCD 为例,伴随 LCD 在美、日、韩、中等国家的技术转移,出现了先发(在位)与后发的博弈迭代转换,即在位者的先发与后发的相对态势在科学、技术、工程等不同维度之间出现美-日、日-韩、韩-中的三次转换(见图 9)。一是日本对美国技术主导地位的颠覆;二是韩国对日本产业技术领先地位的颠覆;三是中国对韩国制造主导地位的颠覆。该案例典型刻画了颠覆性技术由边缘到主流的变革过程中在位者与后发者多轮优劣势转换的竞争路径。

由图 9 可见,颠覆性技术由边缘力量到未来主流的变革过程,伴随科学突破、技术分叉、产业形成、产业锁定的阶跃发展,颠覆性技术领先者与后发者的优劣势不是衡止不变的,竞争机制助力后发者打破领先者垄断锁定。结合 TAE 演化路径分析,由技术跨度到组织,本文提出了一个解释模型。科学突破产生颠覆性技术的原理基础,原创发明创造了首轮领先的根技术节点,以此奠定领先者的地位。技术分叉阶段,原理性突破产生初始的技术发散,后发者将初始技术与初始场景融合产生应用落地,从而形成并掌握了初始技术的创新链、产业链,完成对在位者的第一次优势转换(A-B-B'),获得技术领先地位。产业形成阶段,颠覆性技术产生的若干不同分支技术经过市场选择、试错,收敛涌现出主导型技术,后发者利用主导型技术不成熟、技术体系不完善的机遇,突破主导型技术或辅助技术、支撑技术的瓶颈,完成对在位者的第二次优势转换(B'-C-C'),获得市场或技术的领先地位。产业锁定阶段,主导型技术趋于成熟稳定,加速应用扩散到主

流市场, 后者抓住主流爆发机遇, 利用辅助技术或支撑技术的新突破, 面向应用端融合发展, 获得市场与制造的领导地位, 完成对在位者的第三次优势转换(C'-D-D')。在此基础上, 新的颠覆性技术周期性涌现并循环迭代(D'-E-E'), 推动浪潮式的技术革命。

图 10 显示, 在技术、应用、生态等关键要素综合作用下, 围绕颠覆性技术科学-技术-工程-产业不同发展发



CRT 为“阴极射线显像管”; DSM 为“动态散射模式”; TN-LCD 为“扭曲向列型液晶显示器”; STN-LCD 为“超扭曲向列型液晶显示器”; TFT-LCD 为“薄膜晶体管液晶显示器”; PC 为“个人电脑”

图 9 LCD 在位者与后发者优劣势转换的竞争过程

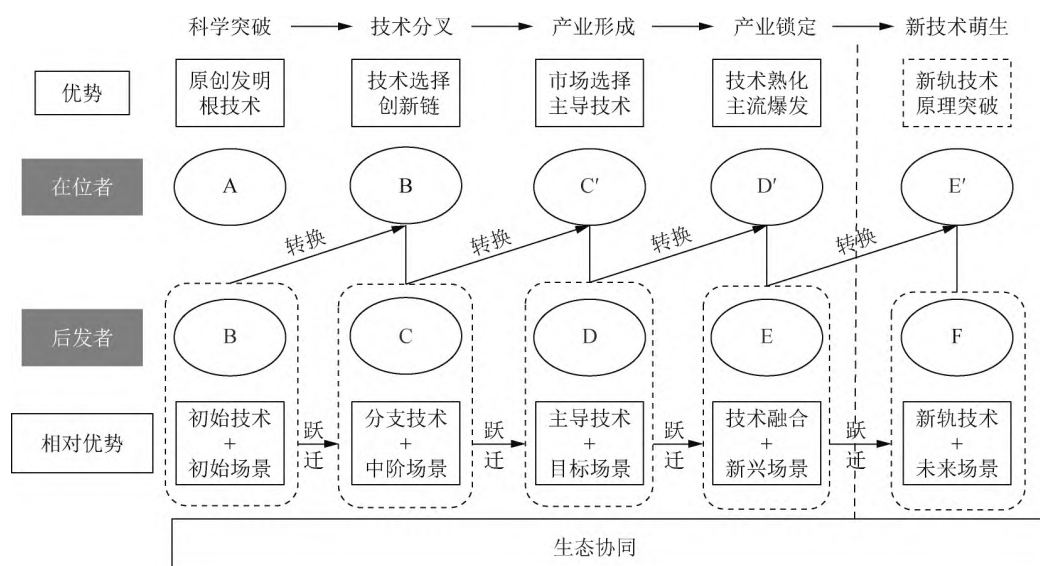


图 10 后发者优劣势转换的竞争机制解释模型

展环节进行市场选择,后发者要承受领先者既有优势和市场与价值网络的挤压排斥等多重考验,通过技术的势差、应用价值的释放以及内外环境的同步协调适配等动态博弈,才能最终促成后发者与在位者产生优劣势的互换,从而实现后发赶超,由上一阶段的边缘力量成为下一阶段新的领先者,由技术层面汇集到组织层面上产生后发到领先迭代多重的动态转换,推动颠覆性技术整体由边缘到主流的变革,并由此揭示动态转换的条件。

五、颠覆性技术具有技术分叉、应用跃迁、生态协同的临界条件

大量案例表明,每一次工业革命的发生发展最终产生出定义时代的主流技术,形成技术锁定、产业垄断、格局既定等态势,不再产生未来,未来的主流一定来源于新兴的边缘。颠覆性技术的发明者往往不是最终的颠覆者,众多市场力量的汇集和前仆后继的参与,推动颠覆性技术由边缘力量转换为未来主流。那么由技术跨越到组织层面,从边缘力量转化为主流需要什么样的条件呢?颠覆性技术从边缘到未来主流的变革过程,历经科学发现与传播、技术发明与转化、创新发展与扩散的漫长演化,在技术、应用、生态等不同维度创造新变量、新要素、新路径,改写既有格局、游戏规则,由边缘转换为现实的能力,为后发者切入轨道打败领先者构建竞争优势创造了转换条件。

(一) 临界条件之一: 技术分叉

技术分叉包含两种模式,一是通过颠覆性根技术基本功能产生多路径的分支技术,二是通过技术的融合发展追加技术功能产生新的分支技术。技术分叉为后发者突破在位者的技术壁垒,弥补技术势差提供了分支技术,利用分支技术结合具体场景的产品开发,从而创造了新路径和不同于在位者的竞争领域。以智能语音为例,语音识别技术结合家居、教育、医疗、车载等具体场景与应用端技术融合,形成智能语音产品系统的4个分支,形成后发者的技术轨道切口。

(二) 临界条件之二: 应用跃迁

应用跃迁是上一轮应用的饱和孕育下一个应用爆发的状态过程。颠覆性技术由边缘到主流的应用跃迁通过应用找技术和技术找应用的双重作用,技术突破与未来场景的需求识别产生新一轮应用爆发,产生差异化的用户需求和有层次的市场分类,形成后发者切入的应用跃迁窗口^[42]。以LCD为例,韩国通过开发大尺寸液晶显示技术与高世代线建设,打破了日本LCD供给垄断局面,开辟了LCD替代阴极射线管(cathode ray tube, CRT)显示产业的主导市场空间,创造了主流应用的爆发,促使韩国在液晶电视技术与大规模制造能力上一举赶超日本。

(三) 临界条件之三: 生态协同

颠覆性技术从边缘到主流的过程中,历经科学-技术-工程-产业的交替演进,不同阶段对应的内外生态环境是不同的,技术的路径演化与其生态的适配与否关系密切,不同的发展阶段需要不同的创新生态适配,由此技术的演化过程伴随对适配生态的选择而发生转移,产生后发赶超。具备或提供适宜的生态条件成为主导颠覆性技术的必要条件。从供给角度来看,能够组合调适内外相关的技术群落、创新主体、市场机制以及资源、人口、资本、政策等环境变量,形成有利于颠覆性技术不同发展阶段的创新主体能力、产业基础、激励政策与社会环境,并促使技术分叉与应用跃迁的复杂涨落在生态调适作用下达到价值共创,形成后发者切入的生态协同窗口。

六、结论与启示

本文通过构建技术-应用-生态(TAE)演化分析框架,既从技术演化的视角深入认识“边缘技术如何取代主流技术”,也从组织博弈的高度分析“后发者如何颠覆在位者”,由此揭示颠覆性技术路径生成与演化的机理,厘清颠覆性技术由边缘到主流的内在逻辑,回答“现在趋势如何重构未来格局”,对颠覆性技术由边缘到主流的系统变革进行刻画,由技术替代跨越到组织存亡、格局重塑,并得到以下启示。

(一) 重视技术科学,加强基础科学前沿交叉融合发展

颠覆性技术来源于基础科学突破,但基础科学并不能直接产生颠覆性技术创新,而是基于技术科学原

理的工程技术重大突破产生的原创性发明,是颠覆性技术的直接来源。颠覆性技术创新的实现过程,不仅需要 0-1 的原理突破,更需要 1-N 的技术分叉与融合递归,通过技术科学研究,既可以将工程实践中的具体问题提炼成基础研究理论问题,获得基础共性技术的理论认知,同时引导面向广泛的潜在应用实现技术更新或创造新技术^[43]。因此,要充分利用技术科学撬动颠覆性技术创新。

(二) 加强需求侧管理,扩大应用场景的培育和供给

颠覆性技术的发展需要应用场景的介入,应用场景将模糊的市场需求通过赋予场景化的功能形成明确的产品形态,是引爆颠覆性技术新突破和渗透扩散的最佳工具。当前颠覆性技术发展的政策以激励技术供给为主体,对需求侧缺乏重视,特别是对于应用场景供给的重视不足,已成为制约颠覆性技术发展的重要瓶颈。因此,要从单纯的场景开放转向体系化、全流程的需求侧管理。

(三) 优化创新生态,更加适配颠覆性技术创新未来发展需求

当前大国竞争已由创新要素竞争演变为生态体系之间的竞争,创新生态的协同发展与否反映了一个国家赋予颠覆性技术创新的适配性,影响甚至决定国家发展颠覆性技术的成败。相比世界科技强国占有领先优势的同时也不可避免存在固化的在位劣势,我国有必要抓住有利时机放大生态协同效应,适配于未来发展需求,推动有利于颠覆性技术创新的生态环境建设。

(四) 把握政策时机,抓住颠覆性技术优势转换节点实现赶超

颠覆性技术是后发国家赶超在位者的战略工具。当前新一轮科技革命与产业变革与我国经济高质量发展转型融合共生,颠覆性技术的孕育爆发对于我国抓住技术分叉、产业锁定等有利时机实现范式间赶超至关重要,为此需要加强战略研究提前部署政策引导,在颠覆性技术发展的不同转换节点实施不同的政策。

参考文献

- [1] CHRISTENSEN C M. The innovator's dilemma[M]. Boston: Harvard Business Review Press, 1997.
- [2] 刘安蓉,李莉,曹晓阳,等. 颠覆性技术概念的战略内涵及政策启示[J]. 中国工程科学, 2018(6): 7-13.
- [3] 曹晓阳. 通过重大颠覆性技术把握产业未来、抓住未来产业[J]. 科技中国, 2023(8): 3.
- [4] DOSI G. Technological paradigms and technological trajectories[J]. Research Policy, 1982, 11(3): 147-162.
- [5] LEIFER R, MCDERMOTT C M, O'CONNOR G C. Radical innovation: How mature companies can outsmart upstarts[M]. Boston, MA: Harvard Business School Press, 2000.
- [6] 克莱顿·克里斯坦森,迈克尔·雷纳. 创新者的解答[M]. 李瑜偲等,译. 2018. 北京: 中信出版社.
- [7] SCHMIDT G M, DRUEHL C T. When is a disruptive innovation disruptive? [J]. Journal of Product Innovation Management, 2008, 25(4): 347-369.
- [8] 周洋,张庆普. 高端颠覆性创新的技术演进轨迹和市场扩散路径[J]. 研究与发展管理, 2017, 29(6): 99-108.
- [9] 刘海兵,刘洋,黄天蔚. 数字技术驱动高端颠覆性创新的过程机理: 探索性案例研究[J]. 管理世界, 2023, 39(7): 63-81, 99.
- [10] 李平,臧树伟. 基于破坏性创新的后发企业创新优势实现构建路径分析[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 295-303.
- [11] 黄鲁成,成雨,吴菲菲,等. 关于颠覆性技术识别框架的探索[J]. 科学学研究, 2015, 33(5): 654-664.
- [12] 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.
- [13] 于光辉,宁钟,李昊夫. 基于专利和 Bass 模型的颠覆性技术识别方法研究[J]. 科学学研究, 2021, 39(8): 1467-1473, 1536.
- [14] 刘云,桂秉修,王小黎. 基于引文网络的颠覆性技术发展路径研究[J]. 科研管理, 2022, 43(11): 32-44.
- [15] 单晓红,韩晟熙,刘晓燕. 基于技术主题演化的颠覆性技术识别研究[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(8): 113-123.
- [16] 刘博文,白如江. 数据融合视角下颠覆性技术的演化脉络与演化特征研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(8): 32-41.
- [17] 张光宇,欧春尧,刘贻新,等. 人工智能企业何以实现颠覆性创新? ——基于扎根理论的探索[J]. 科学学研究, 2021, 39(4): 738-748.
- [18] 张玉磊. 颠覆性创新的动因、过程和实现路径研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [19] 许泽浩,张光宇,廖建聪. 基于战略生态位管理视角的颠覆性技术成长过程研究[J]. 中国科技论坛, 2016(2): 5-9.
- [20] 黄子洋,尹聪慧,张奔. 战略生态位管理视角下颠覆性创新生态系统演进机理研究[J]. 中国科技论坛, 2023(10): 28-40, 61.
- [21] 邵云飞,霍丽莎. 突破性创新的生态系统动态演化及实现机制——关系嵌入与组织合作适配视角[J]. 管理案例研究与评论, 2018, 11(4): 319-332.
- [22] 鲍萌萌. 创新生态系统视角下新兴产业颠覆性创新路径研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [23] 李东红,陈昱蓉,周平录. 破解颠覆性技术创新的跨界网络治理路径——基于百度 Apollo 自动驾驶开放平台的案例研究[J]. 管理世界, 2021, 37(4): 130-159.
- [24] 尚甜甜,缪小明,鲁迪. 颠覆性技术与商业模式共演过程研究[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(4): 12-18.

- [25] 毛荐其,徐艳红. 基于技术生态的新技术涌现研究[J]. 科学学与科学技术管理,2014,35(1): 42-47.
- [26] 郑文范,纪占武. 论陈昌曙人工自然观与科学、技术、工程、产业、社会统一的“五元论”[C]//2012年全国科学学理论与学科建设暨科学技术学两委联合年会. 大连:大连理工大学人文与社会科学学部公共管理与法学学院,2012.
- [27] 阿瑟. 技术的本质:技术是什么,它是如何进化的[M]. 杭州:浙江人民出版社,2014.
- [28] 宋凯,陈悦. 技术主题动态演化分析的一种新方法: DPL-BMM 模型[J]. 情报学报,2024,43(1): 25-33.
- [29] 江积海,阮文强. 新零售企业商业模式场景化创新能创造价值倍增吗? [J]. 科学学研究,2020,38(2): 346-355.
- [30] 尹西明,苏雅欣,陈劲,等. 场景驱动的创新: 内涵特征、理论逻辑与实践进路[J]. 科技进步与对策,2022,39(15): 1-10.
- [31] 梅亮,陈劲,刘洋. 创新生态系统: 源起、知识演进和理论框架[J]. 科学学研究,2014,32(12): 1771-1780.
- [32] 王海军,张文耕,毛天颂,等. 颠覆性创新生态系统的构建与治理——来自三星显示的实践分析[J]. 广西财经学院学报,2021,34(6): 99-111.
- [33] 李桢,欧光军,刘舒林. 高技术企业颠覆性技术创新能力影响因素识别与提升探究——基于创新生态系统视角[J]. 技术与创新管理,2021,42(1): 20-28.
- [34] 吴滨,韦结余. 颠覆性技术创新的政策需求分析——以智能交通为例[J]. 技术经济,2020,36(6): 185-192.
- [35] 李平,吴滨,高洪玮,等. 颠覆性技术创新生态路径研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,2022.
- [36] 李宏伟. 技术进化的社会选择[J]. 自然辩证法研究,2002,18(8): 47-49.
- [37] 刘则渊,陈悦. 现代科学技术与发展导论(第二版)[M]. 大连:大连理工大学出版社,2011.
- [38] 赵红州,唐敬年. 技术增长的指数规律[J]. 科学学研究,1991,9(2): 24-28.
- [39] SCHOENMAKERS W, DUYSTERSAG. The technological origins of radical inventions[J]. Research Policy,2010,39(8): 1051-1059.
- [40] 王志玮,叶凌峰. 基于设计驱动的颠覆性创新机理研究[J]. 创新科技. 2020,20(5): 28-37.
- [41] 周洋,张庆普. 市场导向对跨界整合式颠覆性创新的影响——基于战略选择的调节作用[J]. 科学学与科学技术管理,2019,40(2): 99-113.
- [42] 吴晓波,付亚男,吴东,等. 后发企业如何从追赶到超越? ——基于机会窗口视角的双案例纵向对比分析[J]. 管理世界,2019,35(2): 151-167,200.
- [43] 陈劲,宋建元,葛朝阳,等. 试论基础研究及其原始性创新[J]. 科学学研究,2004,22(3): 317-321.

How Disruptive Technology Evolves from Marginal Presence to Dominant Future Force? Based on a Technology-application-ecology Perspective

Liu Anrong¹, Chen Yue², Wu Bin³, Cao Xiaoyang⁴, We Jieyu³

(1. Science and Technology Information Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Science of Science and S&T Management & WISE Lab, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

3. Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100094, China;

4. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing 100089, China)

Abstract: Disruptive technology possesses the potential to revolutionize mainstream technology trajectories, reshape industry market structures, and redefine the rules of international competition. How it evolves from a marginal force into a mainstream power in the future is of practical significance for technological self-reliance and self-improvement. Based on the innovation theory, the technology-application-ecology (TAE) framework was constructed to analyze the evolutionary paths of disruptive technologies and their mechanisms of action. A process of systemic change was observed through research during the transition of disruptive technologies from marginal forces to future mainstream power. This process is characterized by a dynamic technological evolution trajectory of germination-proliferation-recursion, an application leap path progressing from initial, to intermediate and target, and ultimately to future scenarios, as well as a process of innovation ecosystem transformation that evolves through arboreal, circular, and network-like structures. The systemic revolution of disruptive technologies is intricately shaped by a range of factors: the integrative development of converging technologies, the intensive interplay between technology and its applications, and the dynamic transformation of competitive advantages and disadvantages in latecomer scenarios. It encompasses three critical conditions for the conversion of latecomer advantages: technological bifurcation, application leaps, and ecological collaboration. Finally, policy insights are achieved from various aspects, including emphasizing technology science, strengthening demand-side management, optimizing the innovation ecosystem, and seizing policy opportunities.

Keywords: disruptive technology; technology-application-ecosystem (TAE); marginal forces; future mainstream power