引用格式：袁野，徐子欣，尹西明. 关键数字技术竞争态势与跃迁路径研究——以生物特征识别为例[J]. 技术经济，2026，45(5)：60-75.
Yuan Ye，Xu Zixin，Yin Ximing. Competitive position and transition pathways of key digital technologies：A case study of biometric recognition[J]. Journal of Technology Economics，2026，45(5)：60-75.

技术经济管理

关键数字技术竞争态势与跃迁路径研究
——以生物特征识别为例

袁 野[1,2]，徐子欣[1]，尹西明[3,4]
（1. 重庆邮电大学经济管理学院，重庆 400065；2. 重庆邮电大学信息产业合作研究中心，重庆 400065；
3. 北京理工大学管理学院，北京 100081；4. 北京理工大学国际组织创新学院，北京 100081）

摘 要：实现关键数字技术自立自强是中国打造全球竞争新优势、抢占国际竞争制高点的战略“先手棋”，也是创新引领发展新质生产力、建设现代化产业体系的“胜负手”。以生物特征识别这一典型关键数字技术为例，综合运用技术生命周期、技术轨道和技术跃迁等理论，揭示关键数字技术的全球竞争格局、技术生命演化周期和跃迁路径。从竞争态势来看，关键数字技术全球竞争主体呈现纷繁复杂的动态变迁趋势，且以欧美等国家为主导的技术主路径对中国的后发追赶呈现出一定的“周期性技术锁定效应”。从技术路径演化来看，关键数字技术的发展沿着S曲线的轨迹演进，呈现出由欧洲、美国主导的基础研究向中国引领应用研究创新转变的趋势，且随着全球竞争加剧，关键数字技术由单一模态向多模态技术融合演化。从跃迁路径来看，跨领域多元技术深度融合与新兴场景驱动为中国突破关键数字技术“周期性锁定”和实现技术超越追赶提供了“机会窗口”。研究结论为实现关键数字技术突破与超越追赶提供新的理论框架与实践启示。

关键词：关键数字技术；科技强国；轨道跃迁；生物特征识别；超越追赶；新质生产力
中图分类号：G306 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2026)05-0060-16
DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J26012110

一、引言

党的二十届四中全会审议通过的《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》提出，加强原始创新和关键核心技术攻关；完善新型举国体制，采取超常规措施，全链条推动集成电路、工业母机、高端仪器、基础软件、先进材料、生物制造等重点领域关键核心技术攻关取得决定性突破。当前，新一轮科技革命和产业变革正重塑全球经济结构，关键数字技术已经成为扎实推动科技创新与产业创新深度融合，持续提升中国产业链供应链全球竞争优势的重要战略选择。

当今世界，各国纷纷加紧对数字技术创新进行战略规划和超前布局，关键数字技术已成为经济增长的新动能、大国博弈的焦点。美国出台的《美国政府关键和新兴技术国家标准战略：实施路线图》将人工智能、量子信息等前沿领域列为标准争夺的核心战场。德国主要以“工业4.0”为核心开展数字技术领域攻关。欧盟发布《2030数字罗盘》计划以实现数字主权。日本聚焦“超智能社会”推进科技创新。2023年，《数字中国建设整体布局规划》明确将构筑自立自强的数字技术创新体系作为强化数字中国关键能力的重要目标。与

收稿日期：2026-01-21
基金项目：2025年度重庆市社会科学规划项目中特重点项目“推动人工智能科技创新与产业创新深度融合的路径与对策研究”(2025ZTZD10)；国家社会科学基金“我国企业打造数智技术原始创新策源地的协作模式与路径研究”(23XGL040)；国家自然科学基金面上项目“科技成果转化赋能新质生产力发展：理论基础、组织模式与制度环境”(72474025)
作者简介：袁野(1985—)，博士，重庆邮电大学经济管理学院教授，博士研究生导师，研究方向：人工智能科技创新；徐子欣(2002—)，重庆邮电大学经济管理学院硕士研究生，研究方向：技术创新；(通信作者)尹西明(1991—)，博士，北京理工大学管理学院、国际组织创新学院研究员，博士研究生导师，研究方向：创新管理与科技政策。

此同时，当前中国在关键数字技术部分仍存在快而不强、体系化创新能力不足等现实瓶颈，特别是在高端芯片工艺、核心算力芯片性能等方面与世界先进水平存在差距[1]。面对激烈的国际竞争和脱钩断链风险，实现关键数字技术自立自强、抢占国际竞争制高点是中国应对美西方国家技术封锁战略的关键抓手[2]。因此，围绕关键数字技术，展开全球竞争格局、突破范式与路径研究对于把握发展主动权、构建非对称竞争优势、优化科技战略和提升数字技术创新效能至关重要。

关键数字技术是指对数字经济发展具有核心驱动作用，且在技术领域中占据重要地位的技术，具有不可替代、不易掌握、难以超越、垄断性极强等特征[3]。关键数字技术是重塑国家创新格局与赋能新质生产力的关键力量，能够促进数字技术与实体经济深度融合，通过要素自由流动效应和资源配置优化效应，打破要素和资源市场的“壁垒”，进而催生新产品、新服务、新业态和新行业[4]。相较于一般数字技术，关键数字技术对产业升级、制度变革、经济安全或社会治理具有基础性、引领性、战略性作用[5]。目前学术界围绕关键数字技术展开的研究主要分为以下三类：一是从创新演化，重点分析关键数字技术在城市和区域层面的分布规律、集聚特征及演化逻辑[6]。例如，叶琴等[5]基于技术关联性视角分析中国城市数字技术关联性对城市新技术进入的影响。二是从赋能机制，关注数据开放、政府采购、市场建设等制度供给对关键数字技术创新的外部赋能效应[7]。金环等[8]系统考察公共数据开放这一新型公共服务带来的外部影响，探讨了其通过增强产学研合作来推动企业关键数字技术创新。三是从突破模式，这一类研究关注银行、风投、耐心资本等不同类型资本，如何通过缓解此类技术“高投入、高风险、长周期”的融资约束，进而驱动关键数字技术的突破。陈劲等[9]从资本类型、创新困境、作用机制和场景驱动创新方面探讨其在关键核心技术中的核心驱动作用。现有研究为理解关键数字技术提供了丰富的理论框架与实证基础，但多侧重探讨外部环境因素的影响，对于特定领域和细分方向的研究相对匮乏，特别是对具体技术如何在成熟阶段通过跨领域融合实现轨道跃迁的可能路径的研究较为薄弱。

掌握关键数字技术发展演化规律并探究其实现技术轨道跃迁的可能性是推动关键数字技术迭代更新、破解“卡脖子”困境、构建新的比较优势的前提和基础。生物特征识别技术自 20 世纪 60 年代萌芽以来，全球竞争格局经历了从欧美主导到多极化竞争的动态变迁[10]，经历了相对完整的技术发展阶段，正处于大规模场景应用阶段，呈现出竞争多元化、通用性强、涌现程度快的特征。2023 年，国家知识产权局办公室发布《关键数字技术专利分类体系(2023)》，明确界定了生物特征识别技术这一典型关键数字技术。与量子信息、元宇宙等尚处在萌芽期和成长期的关键数字技术相比，生物特征识别在技术成熟度和产业化进程上具有较为显著的优势[11]，技术专利等相关数据比较完备、易于获取，是分析技术竞争态势和演化规律的理想样本。同时，该技术具有可编辑性、可寻址性、可关联性，使其更容易与其他技术进行重组创新，进而衍生出高融合性与使能性的新特征[12]，成为其突破原有轨道，实现跨领域技术融合和轨道跃迁的关键动力，能够更加生动展示其实现技术轨道跃迁的可能性，为具有一定技术成熟度的底层关键技术如何通过技术融合嵌入未来产业生态系统提供示例。因此，本文选择生物特征识别作为关键数字技术竞争态势与技术跃迁研究的样本，展开实证分析。

基于此，本文结合技术生命周期、技术轨道和技术跃迁等理论，对关键数字技术的竞争态势进行研判，识别技术轨道演化规律，探究技术突破路径依赖、实现跨场景嵌入与轨道跃迁，并以生物特征识别这一关键数字技术为例开展应用验证。立足于中国“十五五”时期加强原始创新和关键核心技术攻关的战略需求，本文通过构建“技术生命周期—技术轨道—技术跃迁”的整合分析框架，突破了以往研究多侧重于外部环境影响或单一技术演化的局限，深入揭示了关键数字技术中普遍存在的周期性技术锁定效应，为解释后发国家如何通过换道超车突破技术封锁提供了新的理论解释逻辑。本文研究为后发国家实现关键数字技术的突破式创新与颠覆性变革、破解新技术和前沿技术的“周期性锁定”提供一定的参考和借鉴，也为中国实现关键数字技术自主可控与高水平科技自立自强提供重要理论支撑与实践指导。

二、文献回顾

关键数字技术通常具有研发投入高、知识结构复杂、技术迭代快等特征，其发展过程往往呈现出高度的

不确定性和路径依赖性[13]。现有研究多从单一技术或单一主体出发,探讨关键数字技术的性能提升或应用扩散,但难以全面揭示多技术路线并存、多主体博弈背景下不同国家和创新主体在关键数字技术领域的竞争格局及其演化方向。而技术竞争态势评估通过对可能给组织的竞争地位带来重大影响的外部科技信息进行分析判断,能够把握竞争主体的竞争地位、掌握竞争对手研发现状及战略布局,确定自身研发战略[14]。

专利数据因其客观化、标准化和信息承载的丰富性,被广泛认为是评估技术竞争态势的主要消息来源[15]。聚焦基于专利数据的关键核心技术竞争态势评估,国内外现有研究提供了丰富的竞争态势评估方法。一是借助专利申请数量的时序分布等来反映技术的演变历程和发展趋势[16]。二是依据专利相关的定量指标分析竞争主体的研发实力[17]。三是从区域视角分析技术在不同市场的布局情况[18]。四是根据专利可视化技术研判技术研究的热点及空白领域[19]。本文从专利视角出发,结合技术生命周期曲线与技术演化主路径等方法分析竞争态势。

技术发展具有时序性和规律性,相较于固定时间窗口的划分方法,技术生命周期能够更准确地反映技术发展的内在规律与创新轨迹,对国家和企业进行前瞻性技术战略布局具有重要意义。技术生命周期的概念由 Arthur 等[20]提出。随后,Harvey[21]及 Foster[22]等学者进一步完善技术生命周期理论,将技术生命周期划分为萌芽期、成长期、成熟期和衰退期四个阶段。随着技术生命周期理论的成熟,更多的学者将其应用于新兴技术发展历程研究。黄山和陈洲玲[23]运用专利计量法与 Logistic 模型,划分新能源汽车产业链上中下游技术生命周期阶段。郑素丽等[24]运用社群分析与主路径分析方法,基于专利申请量和发明人数量划分自动驾驶技术生命周期阶段,识别出十大技术社群。黄颖等[25]运用动态网络探测法,融合动态引文网络与共类网络,通过网络指标量化曲线和分段拟合模型划分技术生命周期阶段,全面评估纳米生物传感器等技术的发展态势。上述研究表明,技术生命周期理论被广泛应用于新兴技术、通用技术和颠覆性技术等预测发展的相关研究中。然而,从已有研究来看,基于技术生命周期探讨关键数字技术发展历程和趋势预测的"黑箱"尚未打开。

后发企业和国家在技术追赶过程中常常陷入"引进—落后—再引进—再落后"的恶性循环,体现出较强的路径依赖性特征[26]。为突破这一困境,技术跃迁被视为实现非连续性、突破性创新的核心机制,为后发国家和企业提供了打破垄断、实现自主创新的战略性机遇,被视为发展中国家实现"跨越式追赶"的"机会窗口"[27]。技术轨道跃迁是指技术在其演化过程中突破原有轨道、进入新的技术路径,通常伴随着新兴技术的发展和跨领域技术融合[28]。而技术融合是实现轨道跃迁的重要机制,不同领域间的深度交叉加速了原始知识结构的重构,推动原有技术体系的跃迁式发展[29]。在技术轨道跃迁路径的研究方面,现有文献提供了多元视角。例如,成琼文等[30]以三一重工为案例,揭示后发企业赶超轨道非连续性跃迁的动态过程,以及数智赋能的作用机制。Sun 等[31]探究创新生态系统、技术轨道跃迁与创新绩效关系,认为企业应优先采用创造性破坏,以新技术替代现有技术、发展新能力。彭文波和余翔[32]对中美欧的技术融合变化进行纵向和横向比较,预测技术发展趋势。刘玉梅等[33]从跨轨道技术融合的角度判定技术轨道跃迁程度并以此预测突破性技术。数字技术,尤其是关键数字技术具备可编辑性、可寻址性、可关联性等特征,其应用创新需要与创新主体进行交互,衍生出融合性与使能性的新特性[34],有助于降低知识黏性,打破传统技术创新的路径依赖,促进知识溢出和技术重组创新,使技术进步方向更加复杂多样,从而产生颠覆性创新成果。现有研究尚未从技术融合视角揭示关键数字技术轨道跃迁的内在驱动机制,大多只是提出了破解技术锁定的方向并没有提出具体的跃迁路径,缺乏从突破性创新的角度基于技术融合理论建立技术轨道跃迁指标并提出量化公式。

鉴于此,本文基于专利数据,结合态势评估、技术轨道识别与轨道跃迁,系统刻画关键数字技术的全球竞争态势及其演化脉络,进而探讨后发国家在成熟技术阶段实现突破式创新的现实路径,为后发国家实现关键数字技术的突破式创新与颠覆性变革、破解新技术和前沿技术的"周期性锁定"提供一定的参考和借鉴。

三、研究设计

(一)研究思路

参考已有研究,本文旨在对关键数字技术的竞争态势、技术轨道演化规律及轨道跃迁路径进行系统性

耦合分析。首先，基于全球专利申请数据，运用 Logistic 模型研判技术生命周期，结合多维度专利计量指标对技术发展态势、竞争主体和重点领域进行分析，揭示全球竞争格局变迁与技术热点分布。在专利引文网络的基础上，采用搜索路径统计数（search path count，SPC）算法进行主路径分析，刻画并识别技术演化阶段与核心技术轨迹。其次，从技术关键度、技术差异度及技术融合度三个维度构建技术轨道跃迁指标体系，量化技术间的融合及跃迁程度。最后，通过对不同技术组合的跃迁潜力进行比较，识别和预测具备“换道超车”潜力的关键技术融合路径与方向。研究框架如图 1 所示。

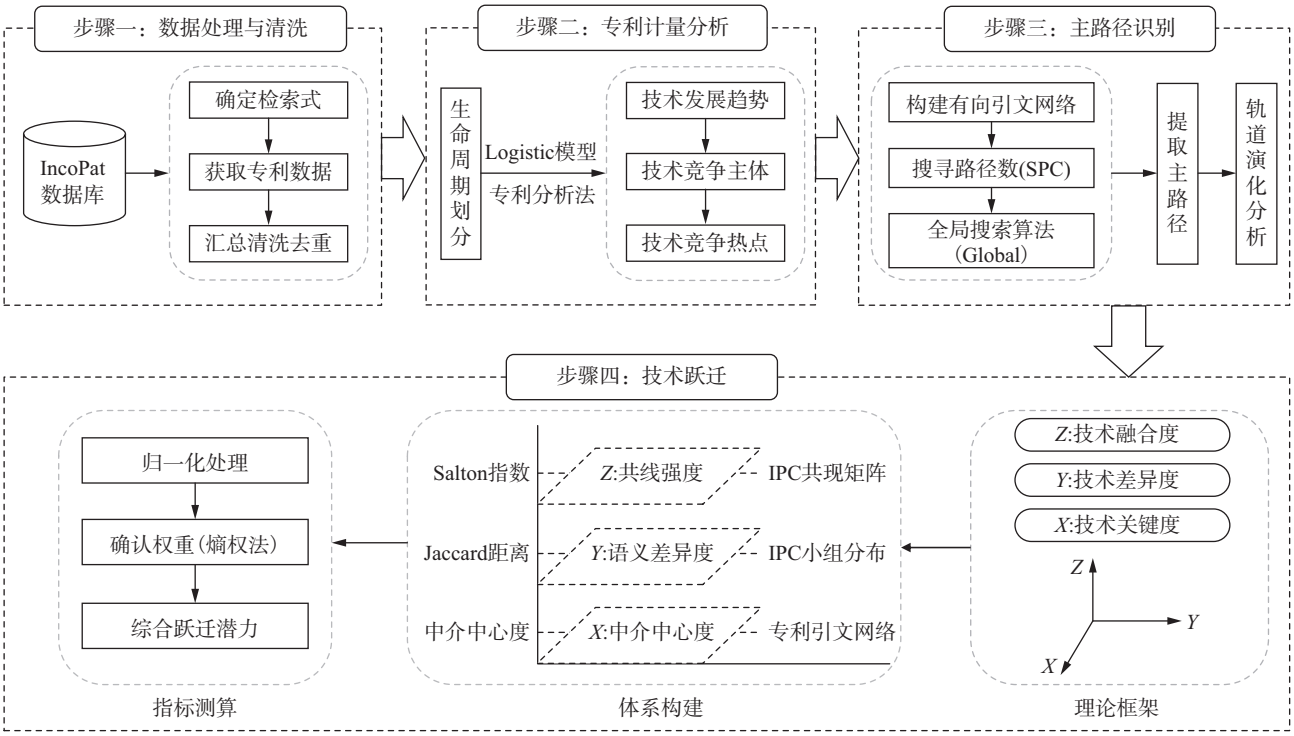

图 1　研究框架

（二）数据获取与预处理

本文以 IncoPat 专利数据库作为样本数据的数据库来源，检索策略表达式为 TIAB =（“biological feature identification” OR “biometric identification” OR “biometric recognition” OR “biometric pattern recognition” OR “biometrics” OR “生物特征识别”）。检索日期为 2025 年 4 月 2 日，检索范围为 1961 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日。下载全字段数据集，字段包括标题、摘要、申请人、公开（公告）号、公开（公告）日、申请号、申请日、公开类型、专利类型、公开国别、国际专利分类（international patent classification，IPC）主分类、IPC、联合专利分类体系（cooperative patent classification，CPC）、当前权利人、第一申请人、申请人国家/地区等。剔除简单同族专利，筛选专利类型为发明申请，选取有效授权专利，对数据进行汇总清洗去重后，共筛选出符合条件的专利 11423 项。进一步对文本数据进行剔除空值、去停用词等预处理操作，作为后续研究的数据集。

（三）研究方法

1. 竞争态势分析方法

（1）生命周期分析。技术生命周期曲线通常表现为 S 型增长模式，能够反映技术从萌芽、成长、成熟、衰退的动态演化轨迹。已有研究普遍将其作为研判技术成熟度和产业发展阶段的重要参照框架，并常结合专利、文献等多源数据进行定量拟合。其中，Logistic 模型因其增长拟合能力强、参数结构清晰，成为生命周期分析中应用最为广泛的经典模型之一[35]。本文采用 Logistic 模型对全球生物特征识别技术生命周期进行研判。Logistic 模型的表达式为

$$Y_t = \frac{K}{1 + e^{-r(t - t_m)}} \tag{1}$$

$$r = \frac{\ln 81}{T_{0.1\sim0.9}} \tag{2}$$

其中：Y_t 为在时间 t 的专利累积申请量；K 为S曲线的峰值；r 为S曲线的斜率；t_m 为专利累积量达到50% K 所需时间；$T_{0.1\sim0.9}$ 为专利总量从10% K 增长到90% K 过程所需时长[36]。

(2)主路径分析。某一技术的技术轨道的识别与发现本质上是一个技术历史的回溯研究，即从技术发展的现在时点，回溯过去，探索那些在技术整体发展的过程中起到关键作用的某些重要技术发明[37]。而主路径分析以专利引文网络为依托，辨识“旧发明”在“新技术”间的知识流向，是较为合适的研究手段[38]。轨道的提取首先根据文献及文献之间的引用关系构建有向引文网络；其次确认遍历权值，依据算法构建有向加权网络；最后确认主路径。

目前的主流算法有搜索路径计数(search path count, SPC)、搜索路径连接数(search path link count, SPLC)、搜索路径节点对(search path node pair, SPNP)。其中SPC算法能够有效地突出在技术扩散过程中起核心作用的专利数据，降低路径遍历的复杂性，避免单纯依赖局部信息而忽略全局结构的问题[39]。因此，本文采用SPC算法，通过计算网络中所有路径对相邻两节点间连接弧的遍历次数，来衡量连接弧在整个网络中的重要程度。计算公式如式(3)所示。

$$SPC(e) = \sum_{i=1}^{k} \mathrm{Sim}(D, C_i) \sum_{s\in S, t\in T} \frac{\delta_{st}(e)}{\delta_{st}} \tag{3}$$

其中：δ_{st} 为从起点 s 到终点 t 的路径总数；$\delta_{st}(e)$ 为经过边 e 的路径数；D 为当前文档；C_i 为前引文档；$\mathrm{Sim}(D, C_i)$ 为当前专利 D 与前引文档 C_i 之间的相似度。

2. 跃迁路径研究方法

1)指标选取

本文借鉴刘玉梅等[33]的分析思路，将技术关键度、技术差异度及技术融合度作为技术轨道跃迁的内生动力，构建关键数字技术融合指标体系，测算技术跃迁潜力。技术关键度的作用在于高价值、高影响力的知识元素及其结合方式是技术发生本质性变化的关键。技术差异度的作用在于跨领域、高差异度技术交叉渗透易产生新功能与应用，但低融合度会阻碍跃迁。技术融合度的作用在于判断技术组合的协同程度，以及是否能够进行有效的交叉融合。只有通过将不同技术轨道上、具有高度差异性和高度关键性的技术进行有效融合并进行持续的迭代实验，才能实现技术的积累和突破，进而实现技术轨道的跃迁[40]。具体而言，首先，根据前两个指标筛选出具有高关键度和高差异度的IPC；其次，借助IPC共现网络判断两个技术之间是否能够有效融合并计算出技术之间的融合度；最后，根据技术轨道跃迁公式计算出技术间的跃迁潜力。

2)技术跃迁测度

步骤1：使用中介中心度指标测度技术关键度，高中介中心度代表节点在知识网络中具有核心地位[41]，计算公式如式(4)所示。

$$BC(v) = \sum_{s,t\in v} \frac{\sigma(s, t \mid v)}{\sigma(s, t)} \tag{4}$$

其中：$BC(v)$ 为技术节点 v 在知识网络中的重要程度，值越高表明该技术越可能成为推动技术跃迁的关键枢纽；$\sigma(s,t)$ 为节点 s、t 之间所有最短路径的数量；$\sigma(s,t \mid v)$ 为节点 s 到节点 t 并且经过节点 v 的所有最短路径的数量。如果 s 与 t 相同，则 $\sigma(s,t)$ 的值为1，如果 v 属于 s 或 t，则 $\sigma(s,t \mid v)$ 的值为0。

步骤2：通过语义相似度量化技术差异度，IPC排列遵循层级结构，通过字符串比较算法计算不同IPC之间的差异度[42]，其值域为[0,1]，计算公式如式(5)和式(6)所示。

$$D_{ij} = 1 - S_{ij} \tag{5}$$

$$S_{ij} = \frac{C_iS \cap C_jS}{C_iS \cup C_jS} \tag{6}$$

其中：D_{ij} 为技术差异度；S_{ij} 为技术相似度。在同一个知识领域中，假设有两个概念 C_i 和 C_j。当 C_j 是 C_i 的子集时，将 C_i 定义为的上位概念，而 C_j 则是 C_i 的下位概念。C_iS 为 C_i 的上位概念集合，是概念 C_i 及其全部的

上位概念组成的集合。C_iS 中至少涵盖 C_i 本身，确保 C_iS 的集合为非空集。

步骤 3：采用 Salton 指数将共现频次转换为 C_j 共现强度，衡量技术融合的紧密程度[43]。

$$R_{ij}=\frac{n_{ij}}{\sqrt{n_i n_j}} \tag{7}$$

其中：R_{ij} 为 IPC_i 和 IPC_j 在专利中共同出现的紧密程度；n_i 和 n_j 分别为 IPC_i 和 IPC_j 在专利集合 C_j 中出现的频次；n_{ij} 为 IPC_i 与 IPC_j 在专利集合中的共现频次。

步骤 4：加权上述三项指标得出生物特征识别技术间的跃迁潜力，计算公式如式(8)所示。

$$T_{ij}=W_1(C_i+C_j)+W_2D_{ij}+W_3R_{ij} \tag{8}$$

其中：T_{ij} 为 IPC_i 和 IPC_j 技术融合后实现技术轨道跃迁的程度；C_i 和 C_j 分别为两者的技术关键度；D_{ij}、R_{ij} 分别为两者之间的差异程度、融合程度；W_1、W_2、W_3 为技术关键度、差异度、融合度的权重。对技术关键度、技术差异度及技术融合度进行数据标准化处理，计算指标权重。标准化公式如式(9)所示。

$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}} \tag{9}$$

指标权重 W_j 计算公式如式(10)所示。

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-E_j)} \tag{10}$$

四、实证分析

(一)技术竞争态势分析

1. 发展趋势

从专利申请趋势来看，当前专利申请总量位居前五的国家包括韩国、美国、日本、印度和中国。基于 2000—2024 年五大主要竞争国家在生物特征识别技术领域的专利申请数量统计结果，形成如图 2 所示的箱线分布图。

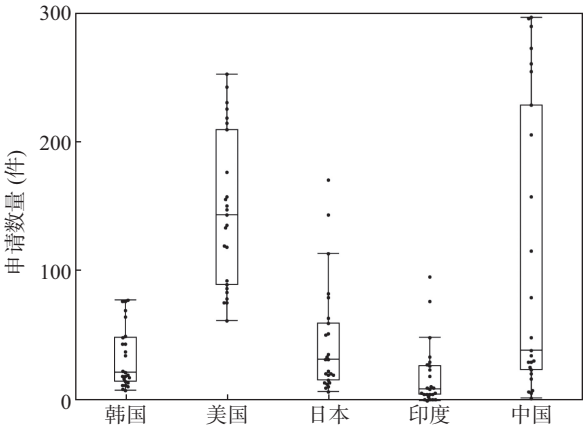

图 2　主要竞争国家专利申请年度分布

整体来看，中国与美国的箱体位置及上限显著高于其他国家，表明两国在专利申请规模和创新活跃度方面具有明显领先优势。其中，中国在生物特征识别领域的专利申请数量整体处于最高水平，高位散点分布密集，存在明显的阶段性增长特征。相比之下，美国的数据分布更集中，专利申请规模保持在较高且相对稳定的水平。日本和韩国位于第二梯队，申请规模中等偏低，技术布局相对有限。印度的箱体位置整体偏低，在生物特征识别领域的专利申请整体规模较小。从中位数来看，美国专利平均申请数量位居首位，中国、日本、韩国的中位数位置相对接近。

生物特征识别技术生命周期的拟合参数见表 1，曲线特征如图 3 所示。成长、成熟和衰退期的分界点分别对应 10% K（t_{10}）、50% K（t_{50}）和 90% K（t_{90}），发展历程可划分为：萌芽期（1990—2006 年）、成长期（2007—2020 年）、成熟期（2021—2033 年）、衰退期（2034—2049 年）。

表 1　技术生命周期拟合参数

参数	累积饱和值	增长因子	增长拐点	R^2	1% K	10% K	50% K	90% K	99% K
值	17132.24	0.16	2019.50	0.9940	1990.33	2005.55	2019.51	2033.46	2048.68

2. 竞争主体

技术竞争主体的阶段动态演化对比分析如图 4 所示。

技术萌芽期(1990—2006 年),专利分布呈现由欧洲、美国和日本企业主导的寡头垄断态势。其中,美国企业(Quid、Raytheon、3M)占比 37.28%,其技术路径呈现明显的军事-工业复合体特征:Raytheon 主要专注于国防和航空航天领域,将生物特征识别技术应用于军事安全和身份认证;3M 公司则在材料科学和电子领域具有优势,为生物特征识别技术的发展提供了材料和技术支持。

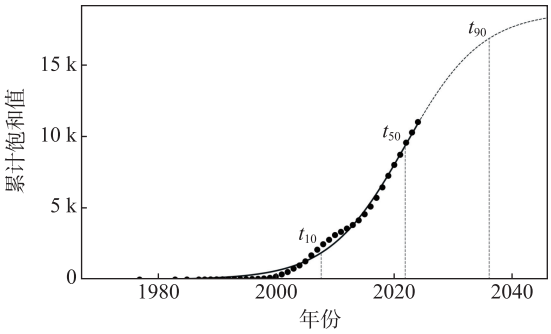

图 3　生物特征识别技术生命周期曲线

技术成长期(2007—2020 年),日本企业在前 10 位中占据四家。富士通和索尼在硬件设备和电子产品领域有深厚积累,日立则在图像处理和模式识别方面具有技术优势。此外,美国微软和国际商业机器公司(IBM)加快推动生物识别向智能化阶段演进。值得注意的是,尽管中国在成长期的专利申请总量很高,但在前两个阶段 TOP10 中均未出现中国企业,说明中国在萌芽期和成长期的原始创新能力较弱。

技术成熟期(2021—2033 年),根据 Logistic 模型的拟合结果,2021—2033 年被判定为生物特征识别技术发展的预测成熟期,全球竞争格局已初步显现出多极化趋势。根据技术成熟期竞争主体分布结果显示(图 4),中国占据 TOP10 的 58.4%份额,有望凭借前期的积累实现持续的后发赶超。中国企业在移动支付、金融安全和智能终端等领域的广阔应用市场,推动了生物特征识别技术的快速发展。生物特征识别技术自 2021 年进入该区间以来,中国企业如平安科技、中国工商银行将生物特征识别技术应用于金融服务,占据了 TOP10 主体的 58.4%,已显现出极强的市场渗透力。OPPO 公司将生物特征识别技术应用于智能手机等终端设备,蚂蚁科技则将其应用于支付宝等移动支付平台,汇顶科技专注于指纹识别芯片的设计和研发等。同时在前十榜单中,美国 Visa 公司的出现也反映出生物特征识别技术在金融领域的应用日益广泛,韩国三星占比位居第二,表明其在图像传感器领域保持技术优势。

本文对技术生命周期阶段的划分基于样本期内专利数据的拟合结果与阶段判别规则,在预测性层面,生物特征识别技术已经进入相对成熟阶段,表现为专利增长速度趋于缓慢、技术迭代由规模化扩张转向结构优化的特征。依据生物特征识别技术的发展进程和演化轨迹预判,随着技术的进一步下沉,专利分布呈现“中心-边缘”动态重构特征。美国通过基础研究保持技术制高点,中国在应用场景和技术创新方面实现后发追赶。未来生物特征识别领域将由单一的技术突破向复杂的产业生态系统嵌入,产业和技术创新发展将以中国、美国为主,日本、韩国、欧洲是产品和服务制造的主要市场。需要指出的是,未来阶段演化仍可能受到全球地缘政治、隐私政策变动及颠覆性替代技术的非线性干扰。

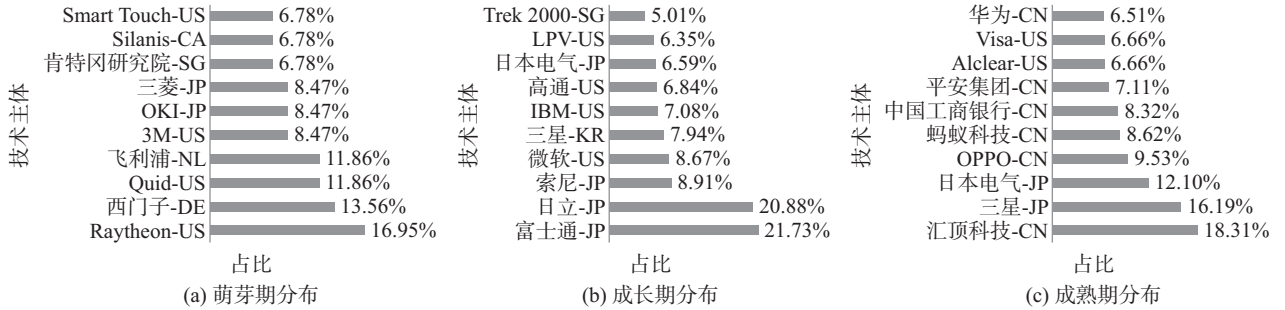

图 4　专利申请量排名前 10 的技术主体

3. 竞争热点

参考袁野等[44]的研究,根据世界知识产权组织(WIPO)国际专利分类(IPC)体系,提取专利 IPC 主分类号的前四位,选取专利申请量 Top10 的主分类号,主要竞争国家在生物特征识别技术领域的研究重点和竞争热点如图 5 所示。从总体上看,电数字数据处理(G06F)和图形数据读取(G06K)等基础技术呈现高度聚集

的态势，两大技术领域占比达 52%，中美的关注度占比均超过 50%。值得注意的是，数字信息的传输（H04L）在各国也占据较多的比例，尤其是在美国（11.7%），说明生物特征识别技术在网络安全和远程身份认证方面的重要性提升。

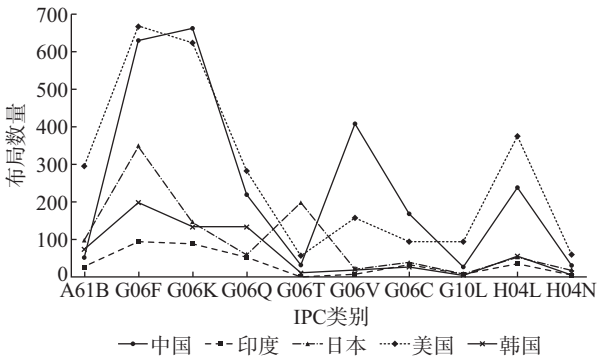

图 5　主要竞争国家热门主 IPC 分类号分布

国家层面，美国在医疗诊断器械（A61B）、G06F 等领域的深厚技术积累使得其在产业发展中占据领先地位。日本在 G06F 领域专利申请占比最高，在数据处理、算法优化等方面具有显著优势。韩国在专门适用于行政、商业、金融、管理或监督目的的信息和通信技术（G06Q）和 A61B 领域的专利申请占比较大，凸显出韩国在商业应用和现代医疗技术发展方面的侧重。中国在 G06K 和 G06F 专利占比较高，在图像处理与视觉计算（G06V）特定细分领域的技术积累较为强势，技术突破主要集中在安防、支付和消费市场等应用层面。

需要指出的是，生物特征识别（尤其是面部识别）技术的全球竞争格局深受各个国家和地区的制度环境与隐私伦理政策的影响，因此该领域的竞争态势也体现为制度约束下的产业化路径差异。以欧盟为例，其围绕隐私保护、数据合规与公共空间监控的社会争议较为突出，欧盟颁布的《通用数据保护条例》（GDPR）禁止在公共场所使用面部识别技术，在一定程度上影响了该技术的规模化部署与应用扩散。美国颁布了《面部识别和生物识别技术暂停法案》，对联邦、州、地方政府、地方实体使用生物识别监控系统加以限制。这些制度差异会影响技术扩散节奏与应用场景选择。相比之下，中国在数字中国建设整体布局规划下，通过移动支付、智慧城市、金融风控等超大规模场景的先行先试，强化数字技术创新体系和数字安全屏障两大能力，形成制度与技术双重创新的协同效应。在该制度背景和保障机制下，中国得以在生物特征识别领域的成熟期实现技术后发赶超并占据领先地位。

4. 技术主路径

基于技术生命周期的主路径分析能够进一步揭示创新主体在不同阶段的原始创新策源能力。参考杨武等[27]的研究，运用 Pajek 软件中的 SPC 算法对该领域专利引文网络进行主路径分析，设置路径数为 15，对技术演进的关键路径进行梳理，绘制了生物特征识别技术轨道，如图 6 所示。萌芽期、成长期和成熟期包含的专利节点数量分别为 4 项、23 项和 4 项，节点编号包括专利申请号、专利申请时间、技术来源国信息。

萌芽期（1990—2006 年）。技术轨道主要包括 4 项专利节点，最早出现的是美国霍尼韦尔国际公司，随后法国索拉克、美国 SENSAR、韩国三星等相继成为该技术策源的起点。在图像采集、数据传输与系统架构上的探索为生物特征识别技术发展奠定了基础。

成长期（2007—2020 年）。第一条路径由美国 AssureTec Systems 公司起步，介绍了一种确认、验证、管理和检测生物特征的装置和方法，逐渐演化至增强型的匹配数据库结构与认证流程。2004 年，Imageware Systems 和 TECH5 USA 两家美国公司提出了多模式生物识别平台，起到了关键作用。此后，该路径出现两条分支，共同推动了生物识别技术由集中部署向分布式应用演化。第二条主路径以 SENSAR 公司提出两项关键专利为起点。在 US20080260211A1 节点，第二条路径与第一条路径汇合，该专利开创性地利用个体心跳波形特征进行身份认证，推动了生物识别技术从静态形态学特征向动态生理信号分析的范式转变。第二条路径逐步独立演化，继续向多模态生物识别系统平台化的方向发展，聚焦于生物识别技术在远程认证、移动设备和嵌入式系统中的应用，重点关注生物特征识别技术的突破与多样化应用。

成熟期（2021—2033 年）。生物特征识别技术朝着平台化部署和应用场景拓展两个方向演进，技术路径分化为两条并行发展的路线。第一条路径以美国艾卫公司的多模态特征识别验证机制为起点，该路径进一步演化，增强了生物识别技术在大规模平台部署中的适配能力，逐步实现从图像数据到深度学习系统的整合。第二条路径由美国 Secure Identity Llc 公司主导，源于无令牌物理安全筛选方法，随后发展至将生物识别技术嵌入行李检查系统，向公共安全和智能系统应用场景发展，将生物特征识别与公共安全、交通安防等实际场景紧密结合。

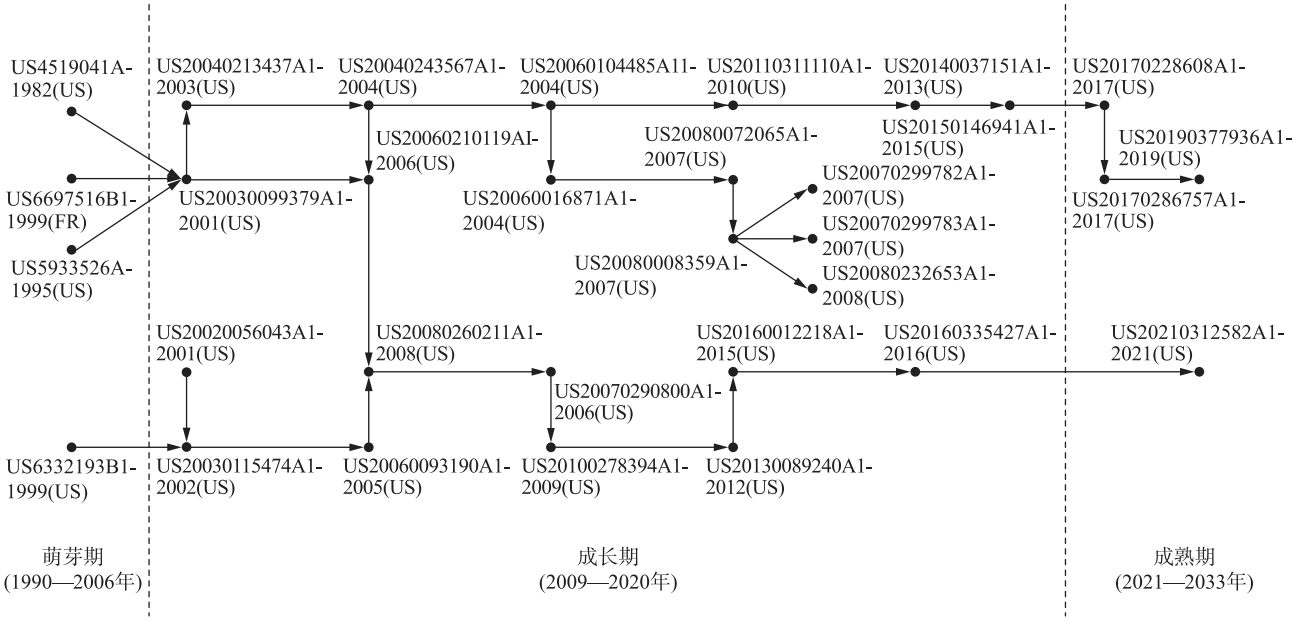

图 6 生物特征识别技术轨道

总体来看,生物特征识别技术在“萌芽期-成长期-成熟期”三个技术轨道演化阶段均由美国等发达国家主导技术发展,在不同时期的主路径上均未出现中国的机构和企业。因此,中国在生物特征识别技术领域可能出现“锁定效应”。需要进一步对未来的技术轨道跃迁路径进行分析。

(二)跃迁路径研究

1. 技术跃迁测度

1)技术关键度

对生物特征识别技术进行 IPC 共现网络分析,得出 IPC 节点的中介中心度。本文将中介中心度 Top15 的 IPC 类别作为关键融合技术集合,用于后续技术差异度与融合度的测算,中介中心度排名前 15 名的技术见表 2。中心度越高,越可能在不同技术板块之间形成关键耦合关系。通过中介中心度测度可知,以 G06F21/32 为核心的底层数据处理与识别算法在知识网络中占据了关键地位,表明以生物测定数据为基础的安全认证是该技术体系融合跨越的关键节点。A61B5/00、G06K9/00 与 H04L9/32 中介中心度位居第二层次,占据核心位置,体现测量诊断、算法能力的底层支撑,以及生物识别与网络/系统安全的深度耦合。

表 2 专利中介中心度 Top15

序号	IPC 分类号	代码定义	中介中心度
1	G06F21/32	使用生物测定数据,如指纹、虹膜扫描或声波纹	534.95
2	A61B5/00	用于诊断目的的测量;人的辨识	406.77
3	G06K9/00	用于阅读或识别印刷或书写字符或者用于识别图形,如指纹的方法或装置	401.10
4	H04L9/32	用于检验系统用户的身份或凭据的装置	371.71
5	G06T7/00	图像分析	243.73
6	A61B5/117	人的鉴别(用于模式识别的方法或布置)	218.01
7	G06K9/62	应用电子设备进行识别的方法或装置	159.40
8	G06F21/31	用户鉴别	136.16
9	G06F21/34	包括外部附加装置的使用,如软件狗或智能卡	132.07
10	G06F21/62	通过一个平台保护数据存取访问,如使用密钥或访问控制规则	127.94
11	A61B5/16	心理术装置;测试反应的时间	114.06
12	G06F21/60	保护数据	112.65
13	G06Q30/06	购买、出售或租赁交易	106.75
14	H04W12/06	鉴权	93.19
15	G06V40/16	面部表情识别如人脸识别,如面部部分、草图或表情	91.21

2)技术差异度

利用差异度计算公式得出生物特征识别技术中心度指数排名靠前的技术间的差异度见表3。在IPC第一层级上,关键技术主要分布于G部(信息/计算)、A部(人类生活/医疗测量)与H部(电通信)三大技术部,其中G部占比最高(66.67%),不同技术部之间的差异度为1,表明该领域的关键技术组合天然具有跨知识域属性,为跨域重组提供了结构基础。进一步地,G06F21/32、G06K9/00、G06T7/00之间所属同一个大类G06,差异度仍保持在0.6,说明信息处理大类是由安全认证、识别方法与图像分析等不同功能板块构成的分工结构。从第四层级和第五层级来看,差异主要来源于最后细分层级,说明这些组合外溢空间相对有限。基于上述差异度结构,本文选择G06F21/32、H04L9/32、A61B5/117、G06T7/00、G06K9/00这五类差异度较大且关键程度较高的子技术进行技术共现分析,作为后续共现分析与融合度测算的对象。

表3　技术IPC(小组)差异度

IPC分类号	G06F21/32	A61B5/00	G06K9/00	……	A61B5/16	G06F21/60	G06Q30/06	H04W12/06	G06V40/16
G06F21/32	0	1	0.6	……	1	0.2	0.6	1	0.6
A61B5/00	1	0	1	……	0.2	1	1	1	1
G06K9/00	0.6	1	0	……	1	0.6	0.6	1	0.6
……	……	……	……	……	……	……	……	……	……
A61B5/16	1	0.2	1	……	0	1	1	1	1
G06F21/60	0.2	1	0.6	……	1	0	0.6	1	0.6
G06Q30/06	0.6	1	0.6	……	1	0.6	0	1	0.6
H04W12/06	1	1	1	……	1	1	1	0	1
G06V40/16	0.6	1	0.6	……	1	0.6	0.6	1	0

3)技术融合度

在确保所选IPC组合具备高关键性与较强异质性的前提下,进一步分析其融合程度,构建生物特征识别技术的IPC共现矩阵见表4。对生物特征识别技术中所筛选出的五类子技术进行共现分析。表4从共现强度角度刻画了关键子技术之间的融合紧密程度,G06F21/32与H04L9/32的共现强度最高(0.317),表明基于生物测定数据的安全认证与系统用户身份/凭据检验是当前生物特征识别技术体系中最核心的融合路径之一。而A61B5/117与H04L9/32、H04L9/32与G06K9/00等高差异度组合的融合度目前尚处于低位,提示通信/检验装置与人的鉴别/测量或识别方法等领域的融合不足。

表4　IPC共现矩阵

IPC分类号	G06F21/32	H04L9/32	A61B5/117	G06T7/00	G06K9/00
G06F21/32	1	0.317	0.112	0.214	0.178
H04L9/32	0.317	1	0.023	0.174	0.060
A61B5/117	0.112	0.023	1	0.236	0.149
G06T7/00	0.214	0.174	0.236	1	0.134
G06K9/00	0.178	0.060	0.149	0.134	1

4)跃迁潜力测度

对技术组合的技术轨道跃迁指标(技术关键度、技术融合度、技术差异度)进行数据标准化,利用熵权法测算出生物特征识别技术三项指标的权重分别为0.25992、0.45927、0.28079。将其带入技术轨道跃迁程度公式进行计算,将技术组合按跃迁程度由大到小进行排列见表5。

2.技术跃迁路径

后发国家技术追赶理论认为,后发者在追赶过程中,不仅需要依靠模仿、有效吸收、应用和改造,还包括进一步的技术创新能力[45]。由于技术范式变化导致技术轨道更迭,在新的技术轨道竞争中后发国家和先发国家拥有平等的机会,后发国家较少地囿于旧技术范式锁定的影响,并且应用场景驱动、市场机制培育等因素在技术追赶的过程中起到了重要作用[46]。因此,发展关键数字技术,选择在新兴的技术轨道开展追赶非常重要。基于表5结果,参考孙冰和鞠卓芳[47]及王金凤等[48]的研究,对生物特征识别技术领域的十条跃迁

表5 技术轨道跃迁路径

跃迁路径	IPC(小组)技术组合	跃迁程度	IPC(小组)技术组合的技术内涵
路径1	G06F21/32和H04L9/32	0.98	使用生物测定数据,如指纹、虹膜扫描或声波纹和用于检验系统用户的身份或凭据的装置
路径2	G06F21/32和A61B5/117	0.70	使用生物测定数据,如指纹、虹膜扫描或声波纹和人的鉴别(用于模式识别的方法或布置)
路径3	H04L9/32和G06T7/00	0.69	用于检验系统用户的身份或凭据的装置和图像分析
路径4	A61B5/117和G06K9/00	0.67	人的鉴别(用于模式识别的方法或布置)和阅读或识别印刷或书写字符或者用于识别图形,如指纹的方法或装置
路径5	H04L9/32和G06K9/00	0.67	用于检验系统用户的身份或凭据的装置和用于阅读或识别印刷或书写字符或者用于识别图形,如指纹的方法或装置
路径6	A61B5/117和G06T7/00	0.66	人的鉴别(用于模式识别的方法或布置)和图像分析
路径7	H04L9/32和A61B5/117	0.53	用于检验系统用户的身份或凭据的装置和人的鉴别(用于模式识别的方法或布置)
路径8	G06F21/32和G06K9/00	0.41	使用生物测定数据,如指纹、虹膜扫描或声波纹和阅读或识别印刷或书写字符或者用于识别图形,如指纹的方法或装置
路径9	G06F21/32和G06T7/00	0.36	使用生物测定数据,如指纹、虹膜扫描或声波纹和图像分析
路径10	G06T7/00和G06K9/00	0.21	图像分析和阅读或识别印刷或书写字符或者用于识别图形,如指纹的方法或装置

路径所生成的新兴技术方向和跃迁路径做进一步讨论。

(1)跃迁路径1是生物测定技术(G06F21/32)与身份验证装置技术(H04L9/32)的融合。目的在于验证身份以判定是否有权访问特定的物理或数字资源。通常需要硬件支持,如指纹识别器、虹膜扫描设备或麦克风,以及相应的软件算法来处理和比对生物测定数据,主要用于身份验证,强调个体与特定权限的匹配。通过将指纹、虹膜扫描、声波纹等多种生物测定技术集成到一个系统中,可以显著提高身份验证的准确性和安全性。

(2)跃迁路径2是生物测定技术(G06F21/32)与人的鉴别技术(A61B5/117)的融合。应用于广泛的场景,如行为分析、人群监控、健康监测等,主要用于模式识别。这种多模态认证方法减少了单一生物特征的局限性,容易实现技术轨道的跃迁。通过探索在健康监测、智慧城市、远程工作、智能交通等新兴领域的应用,在新的应用场景中实现技术的部署,通过应用创新推动技术轨道的跃迁。

(3)跃迁路径3是身份验证装置技术(H04L9/32)与图像分析技术(G06T7/00)的融合。侧重于对生物特征图像(如面部、虹膜等)的分析和识别,涉及复杂的图像处理和机器学习算法。通过图像分析与身份验证装置融合能够拓展新的应用场景,目前图像分析技术的发展使得无接触验证变得更加准确和可靠。这种技术融合不仅可以应用于安全领域,还可以扩展到零售、医疗、金融等多个行业,如通过面部识别进行支付验证、病人识别等。

(4)跃迁路径4是人的鉴别技术(A61B5/117)与图形识别(如指纹)技术(G06K9/00)的融合。图形识别(如指纹)技术和图像分析技术是生物特征识别技术领域的重要组成部分。图形识别技术依赖于图像处理和模式识别的原理,通过分析生物特征的图像数据,提取特定的图形特征(如指纹的脊线、分叉点等),并将这些特征与数据库中存储的特征进行比对,以验证个体的身份。通过将这些先进算法应用于人的鉴别技术,如面部识别、虹膜识别等,极大地提高了识别的准确性和效率。

(5)跃迁路径5是身份验证装置技术(H04L9/32)与图形识别(如指纹)技术(G06K9/00)的融合。包括更广泛的信息识别方式,不仅限于图像分析,也包括文本和图形模式的识别。图形识别技术具备高唯一性和易用性,与身份验证装置集成后,提升系统的便捷性、安全性与抗伪造能力。随着图形识别算法的进步,如深度指纹特征提取、多尺度图形匹配等方法的发展,使得该融合技术在低质量图像、复杂背景等环境下的识别准确率持续提升。未来,通过应用突破实现生物特征识别技术的轨道跃迁,有望在物联网安全、智慧政务、边境控制等新兴应用领域加速部署。

(6)跃迁路径6是人的鉴别技术(A61B5/117)与图像分析技术(G06T7/00)的融合。依赖于计算机视觉和机器学习算法,图像分析技术可以处理和解析从摄像头或其他图像捕获设备中获取的图像数据,包括图像预处理、特征提取、模式识别等,旨在理解图像内容并做出相应的判断。深度学习模型能够从大量的图像

数据中自动学习和提取复杂的生物特征，实现即使在复杂环境下（如变化的光照、遮挡、不同角度等）也能准确识别的能力，从技术创新突破的角度实现生物特征识别技术的轨道跃迁。

（7）跃迁路径 7 是身份验证装置技术（H04L9/32）与人的鉴别技术（A61B5/117）的融合。该组合强调系统侧身份核验机制与识别侧模式判别能力的协同，重心向安全协议集成迁移，主要解决多因素身份鉴权中的协议兼容性问题。通过将物理层的人体特征鉴别逻辑嵌入网络层的安全加密协议中，可在远程登录、移动终端、在线交易等场景中实现更连续、更动态的身份认证，从而提高认证可靠性与对抗伪造的能力。

（8）跃迁路径 8 是生物测定技术（G06F21/32）与图形识别（如指纹）技术（G06K9/00）的融合。该路径更侧重于将生理特征数据转化为可供大规模检索的图形学特征向量，提升海量库匹配的检索效能。在超大规模城市治理及边境管理场景下，该组合能够将识别精度提升至千万级实时检索，向工业化交付的趋势演进。

（9）跃迁路径 9 是生物测定技术（G06F21/32）与图像分析技术（G06T7/00）的融合。该组合聚焦于以图像为载体的生物特征模态（如人脸、虹膜等）在复杂环境下的分析处理。通过将图像分析环节的图像预处理、目标检测、特征提取与质量评估的分析结果进一步嵌入身份识别与认证使用流程，对视觉语义进行深度挖掘。

（10）跃迁路径 10 是图像分析技术（G06T7/00）与图形识别（如指纹）技术（G06K9/00）的融合。该组合更多体现在底层算法的优化与算力适配上，即通过改进特征表示与匹配策略提升识别性能。对轨道跃迁的拉动作用相对有限，但作为底层模块，可为其他跃迁路径提供必要的环境兼容性支持。

3. 进一步讨论

通过对十条跃迁路径进行梳理可以发现，技术跃迁潜力较强的方向多聚焦于生物识别、身份验证、图像处理等核心交叉环节，这说明该领域的跨技术融合和新兴技术轨道的整合已经成为关键数字技术突破“周期性锁定”的重要方向。具体而言，以美、欧、日为代表的发达国家多依靠底层通用性技术和核心能力积累维持领先优势。就跃迁路径 1、3、7 所体现的技术组合特征来看，倾向于通过在既有理论范式内的深度挖掘，由原创范式创新带动技术轨道跃迁。例如，美国领军企业（如霍尼韦尔、SENSAR）通过底层数学模型和物理传感原理的原始突破实现跃迁，形成了极高的技术壁垒和周期性锁定。相对而言，中国等后发国家的跃迁（主要体现为跃迁路径 2、5、6）更突出应用牵引特征，强调在系统集成与场景部署中的迭代优化，呈现出明显的场景驱动型跃迁。通过将成熟的识别技术嵌入移动支付、智慧政务、公共安全等超大规模场景中，驱动技术向多模态深度融合、行为意图理解等边缘节点发生跃迁。进一步说明，技术在具有一定成熟度后，与场景的深度结合能有更强的泛化能力和影响力，这可能成为后发国家实现路径跃迁与扩散优势的重要抓手，而发达国家则更可能通过底层通用能力的强化巩固其轨道优势。

综合上述竞争态势与跃迁路径的实证发现，技术属性、创新主体能力、应用场景等多方面因素共同作用塑造并影响了关键数字技术演变。从技术属性看，关键数字技术具备可编辑性、可寻址性与可关联性，这使其更容易与其他技术要素发生重组并形成融合性、使能性的新特征，从而降低知识黏性、弱化路径依赖并促进知识溢出与技术重组创新，进而呈现出多模态融合与跨模块组合路径。从创新主体能力结构看，领先国家/地区更可能依托底层通用能力与原创积累维持技术主路径优势，而后发国家更可能通过选择关键交叉点、进行跨域组合与场景嵌入，形成“非对称”优势并在新轨道上实现赶超。从应用场景看，部分跃迁路径表现为应用场景牵引型，表明后发国家在嵌入超大规模应用场景的追赶过程中，通过形成数据-算法-应用的反馈机制，能够在一定程度上弥补基础研究短板，推动成熟技术沿着系统集成、多模态融合与工程化优化方向持续迭代。

基于此，本文结合颠覆性创新和突破性创新的科学内涵，从技术融合的视角对生物识别技术轨道跃迁模型和机制路径做了进一步阐释（图 7）。旧技术轨道通过不同领域的技术交叉融合，突破了原知识结构对技术轨道的限制，跃迁至新技术轨道上，实现了技术轨道的跃迁。交叉融合内部为原本分散在不同技术轨道中的异质知识（知识模块、技术要素、能力单元等），在某一时间窗口内发生重组与融合，并且新技术轨道的技术水平高于旧技术轨道，将 t 时刻新旧技术轨道间的距离 AB 视为技术轨道的跃迁程度。

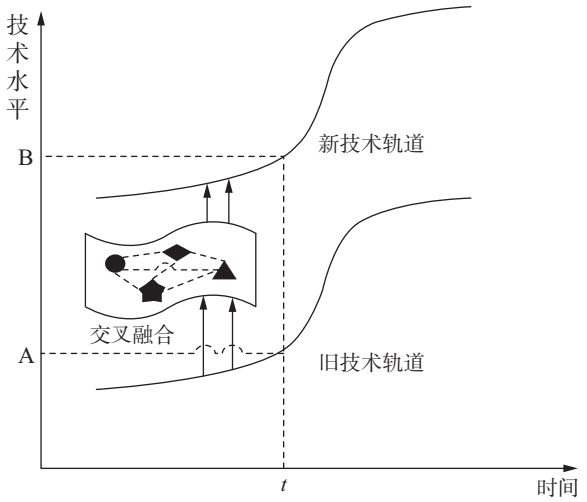

图 7 关键数字技术跃迁机制

五、研究结论与启示

(一)结论与贡献

从总体竞争态势来看,关键数字技术全球竞争主体呈现纷繁复杂的动态变迁趋势,且以欧美等国家为主导的技术主路径对中国的后发追赶呈现出一定的“周期性技术锁定效应”。例如,萌芽期与成长期,欧洲、美国、日本企业长期占据全球专利申请主体前列,中国企业未能跻身全球核心竞争圈。而在成熟期,中国企业在专利申请量上跃居全球首位,中国在安防、支付等领域形成了应用导向的创新优势。实证结果表明,仅靠既有轨道的积累和追赶难以摆脱路径依赖,必须抓住技术范式更迭带来的“机会窗口”实现跨越式发展,促使技术跳脱出原有的技术轨道并跨越至全新的技术轨道中[49],实现从“跟跑”到“并跑”甚至“领跑”的跨越。本文进一步揭示了中国未来关键数字技术实现突破式创新的技术轨道与发展方向,打开了后发国家实现关键数字技术创新跨越的“时间机会窗口”,丰富了以数字技术为代表的新一轮科技革命与新兴技术创新范式等相关理论。

从技术路径演化来看,关键数字技术的发展沿着 S 曲线的轨迹演进,呈现出由欧洲、美国主导的基础研究向中国引领应用研究创新转变的总体态势,且随着全球技术竞争的不断加剧,关键数字技术由单一模态向多模态技术融合演化。例如,在萌芽期,美国将生物特征识别技术运用于军事和工业领域,在萌芽期奠定较强的基础研究和原始创新策源优势。而中国在成熟期通过移动支付、智能终端等新兴场景的创新应用实现了后发追赶,但在原始创新与关键核心技术知识自主可控等方面仍存在短板。已有研究表明,在数字创新浪潮的推动下,中国在数字产业凭借其海量丰富的数据、超大规模的市场和丰富多元的应用场景实现关键技术的“异军突起”,成为数智时代后发国家产业技术赶超的成功典范。本文从更为动态的视角清晰地展现和揭示了中国在关键数字技术领域面临“周期性锁定”的困境和成因,主要表现在技术轨道的策源能力不强、基础研究能力较弱等问题。

从跃迁路径来看,跨领域之间的多元技术深度融合与应用场景的驱动为中国突破关键数字技术的“周期性锁定”和实现技术后发追赶提供了“机会窗口”。例如,生物测定数据使用(G06F21/32)与身份凭据验证(H04L9/32)等应用场景在交叉领域形成了跃迁潜力最强的技术组合,标志着技术演化正在由静态模态识别向动态生理特征识别与多模态融合拓展。由此可见,生物特征识别技术通过生物测定数据、身份认证、图像分析等多领域技术的深度融合,展现出明显的跃迁潜力。本文结论进一步揭示了中国实现关键数字技术突破的现实路径,即以加强应用基础研究为导向、以新场景为牵引的前沿交叉技术布局,推动从“应用追赶”转向“原始创新牵引”的政策机制。同时,强化“底层技术深耕”与“场景驱动创新”深度融合,实现从“技术沉淀者”向“技术轨道引领者”的跃迁。

（二）政策建议

面对激烈的国际竞争和技术封锁，基于研究发现，本文提出“十五五”时期准确洞察关键数字技术的竞争态势，实现核心技术的非对称赶超和技术跃迁的如下政策建议，助力突破美西方国家对华“小院高墙”“脱钩断链”带来的不确定性和风险，加快实现关键数字技术的自立自强。

第一，加强关键技术预见与竞争态势跟踪，因地制宜选择产业核心技术突破模式。面对全球竞争的动态变迁和“周期性锁定”困境，需建立常态化的关键数字技术预见与竞争情报分析机制。围绕不同技术的产业属性和创新机理，分类施策，做好有组织的科研攻关与创新协作。对于基础研究薄弱、易被“锁定”的领域，采用“全链条驱动”模式，树立“根技术”思维，洞察并破解技术“黑箱”，深入融入创新链的源头环节，补齐原始创新短板。对于具备应用场景优势的领域，坚持“市场需求+基础研究”双轮驱动，打通从“实验室”到“市场”的“最后一公里”，以场景驱动反哺技术迭代和科技成果转化，巩固并扩大非对称优势。

第二，以场景驱动体系化布局技术融合赋能，贯通从基础研究到产业应用的“全链条”。跨领域技术融合是实现轨道跃迁的关键，通过体系化布局，为技术融合提供组织保障和资源支持[50]。在组织模式上，应鼓励建立跨学科、跨机构的“任务导向型”创新联合体，高效配置科技力量和创新资源，构建政产学研用多元协同的攻关合力。加快构建场景与科技双轮驱动的创新机制，既支持面向产业场景的融合创新，又保障源于好奇心驱动的科学探索。在创新链条上，必须强化作为科技创新源头的基础研究，推进创新链产业链资金链人才链深度融合。一方面，在加大政府资金扶持的基础上，完善多元化投入机制，积极引导领军企业加强“从0到1”的基础研究；另一方面，要建立有效的市场需求发现机制，加快科技成果交易市场建设和新技术新产品新场景大规模应用示范，以场景开放和新场景大规模应用为牵引，疏通从基础研究到应用基础研究再到产业化的转化渠道，使创新研发与产业应用精准对接，提高创新体系的整体效能。

第三，统筹顶层设计与市场机制，构建高效协同的原始创新策源体系。关键数字技术的非线性、多学科融合等特点，决定了其重大突破不仅需要长期厚重的基础研究与科学知识的积累沉淀，更依赖于国家层面的顶层设计和高效的资源配置体系。应充分发挥“有为政府”在创新体系中的战略引导功能，围绕国家重大需求，做好原始创新的顶层规划和系统布局。同时，打造兼顾公平效率的“有效市场”，通过搭建各类协同创新平台、优化政策工具等方式，促进各类信息、技术、人才、资金等创新要素的充分流动和高效共享，最终形成“基础研究+核心技术+共性技术+应用研究”四位一体、循环促进的原始创新策源体系。

（三）未来展望

现有研究多关注新兴技术的“从0到1”的突破，对处于成熟期的关键技术如何实现非连续性创新、有效嵌入未来产业生态系统的探讨不足。本文将技术生命周期、主路径分析与技术融合跃迁测度等理论方法有机耦合，有效研判技术当前的全球竞争格局与演化脉络，量化识别未来最具突破潜力的技术融合方向。通过实证揭示中国在生物特征识别领域“应用驱动”的追赶模式，即在基础研究落后的情况下，通过庞大的市场应用场景实现快速追赶，创新性地提出并验证了成熟技术通过跨领域技术融合实现“轨道跃迁”的可能性。后发者可以通过战略性地选择技术融合的交叉点，构建“非对称”优势，从而在新的技术轨道上与先发者并跑甚至领跑，丰富技术追赶理论的内涵，为后发国家破解“周期性锁定”、实现“换道超车”提供了理论与实践工具。

本文仍存在进一步优化的空间：第一，数据来源主要依赖专利数据作为分析关键数字技术竞争态势和演化路径的核心依据。虽然专利是技术创新的关键指标，但无法捕捉非专利形式的创新，未来的研究将进一步整合学术文献、行业报告、企业财报等多源异构数据，增强研究结果的全面性。第二，本文采用的模型框架虽具创新性，但也基于特定的假设，主路径分析可能会忽略被引量小但具有颠覆性的新兴技术，跃迁潜力模型主要基于技术本身的内在属性，未来将更深入地探索市场需求、产业政策、投融资活跃度等关键外部变量。

参考文献

[1] 孙明汉，魏雪迎，朱秀珠. 关键核心技术群落识别与创新态势评估模型构建——基于全球PCT专利数据的实证研究[J]. 科技进步与对策，2025，42(12)：129-139.

[2] 李林, 李俊斌, 楚武干. 数字经济时代数字生产的新动能、新变革及新形态[J]. 重庆邮电大学学报(社会科学版), 2025, 37(5): 158-168.
[3] 周阔, 曲植, 时运通, 等. 地方政府债务治理与民营企业新质生产力——基于关键数字技术突破的考察[J]. 经济评论, 2024(4): 20-37.
[4] 尹西明, 陈劲. 加快发展新质生产力: 创新引领高质量发展的中国路径[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2024.
[5] 叶琴, 蒋海云, 曾刚, 等. 中国城市关键数字技术创新格局: 技术关联性的作用[J]. 地理科学进展, 2025, 44(5): 896-907.
[6] LI R, RAO J, WAN L. The digital economy, enterprise digital transformation, and enterprise innovation[J]. Managerial and Decision Economics, 2022, 43(7): 2875-2886.
[7] 张燕, 黄俊杰, 陈臻. 数字经济赋能制造业转型升级: 逻辑、案例与路径——基于"技术-经济范式"演化的视角[J]. 技术经济, 2024, 43(11): 49-59.
[8] 金环, 牛子恒, 岳中刚. 公共数据开放、产学研合作与关键数字技术突破[J]. 财经论丛(浙江财经大学学报), 2025(9): 17-27.
[9] 陈劲, 侯二秀, 李鑫, 等. 企业主导的关键核心技术攻关研究综述[J]. 创新科技, 2025, 25(4): 1-19.
[10] 褚婧一. 论生物识别信息界定中的识别标准及我国的建构[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2023, 37(4): 85-97.
[11] 宋博文, 栾春娟, 梁丹妮. 机器学习视域下新兴技术主题识别研究——基于技术特征相似性[J]. 现代情报, 2022, 42(9): 49-57.
[12] 叶琴, 蒋海云, 曾刚, 等. 关键数字技术融合对城市技术突破的影响研究[J]. 城市问题, 2024(11): 33-41.
[13] 栗晓云, 夏传信, 施建军. 数字技术驱动制造企业高质量发展战略研究——基于三一重工、特斯拉和酷特智能的多案例研究[J]. 技术经济, 2023, 42(5): 149-161.
[14] 郑思佳, 汪雪锋, 刘玉琴, 等. 关键核心技术竞争态势评估研究[J]. 科研管理, 2021, 42(10): 1-10.
[15] CAVIGGIOLI F. Technology fusion: Identification and analysis of the drivers of technology convergence using patent data[J]. Technovation, 2016, 55: 22-32.
[16] JIANG L, ZOU F, QIAO Y, et al. Patent analysis for generating the technology landscape and competition situation of renewable energy[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 378: 134264.
[17] 黄山, 陈洲玲. 基于专利计量和技术生命周期预测的新能源汽车全产业链技术竞争态势研究[J]. 中国科技论坛, 2023(10): 62-73.
[18] 王雪原, 孙美霞. 双层嵌套聚类下的专利群落确定及技术布局策略研究[J]. 情报杂志, 2023, 42(3): 110-116, 150.
[19] 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]. 科技进步与对策, 2025, 42(5): 21-31.
[20] HAN S, HUANG H, HUANG X, et al. Core patent forecasting based on graph neural networks with an application in stock markets[J]. Technology Analysis & Strategic Management, 2024, 36(8): 1680-1694.
[21] HARVEY M G. Application of technology life cycles to technology transfers[J]. Journal of Business Strategy, 1984, 5(2): 51-58.
[22] FOSTER R N. Working the S-curve: Assessing technological threats[J]. Research Management, 1986, 29(4): 17-20.
[23] 黄山, 陈洲玲. 基于专利计量和技术生命周期预测的新能源汽车全产业链技术竞争态势研究[J]. 中国科技论坛, 2023(10): 62-73.
[24] 郑素丽, 吴盛豪, 郭京京, 等. 自动驾驶汽车技术轨道演进研究——基于社群识别和主路径分析的整合框架[J]. 科研管理, 2022, 43(2): 126-136.
[25] 黄颖, 袁佳, 叶冬梅, 等. 基于动态网络探测的技术生命周期识别研究[J]. 数字图书馆论坛, 2025, 21(4): 61-71.
[26] 吴晓波, 邵贻玥, 林福鑫. 突破关键核心技术创新"死亡之谷"的路径机制[J]. 科学学研究, 2026, 44(1): 129-140.
[27] 杨武, 陈培, DAVID G, 等. 技术轨道延伸与破解技术路径锁定研究——以光刻产业为例[J]. 科学学研究, 2023, 41(6): 1014-1026.
[28] 范书琴, 刘国新, 张鹏飞. 制造业升级背景下国外技术轨道锁定的识别及破解研究[J]. 科研管理, 2023, 44(9): 131-140.
[29] 许佳琪, 汪雪锋, 陈虹枢, 等. 跨领域颠覆性技术主题识别研究——以脑科学技术为例[J]. 图书情报工作, 2024, 68(15): 44-57.
[30] 成琼文, 郭波武, 赵晓鸽, 等. 后发企业创新赶超中的轨道非连续性跃迁机制研究: 三一重工的案例研究[J/OL]. 科学学与科学技术管理, 1-21[2026-04-11]. https://doi.org/10.20201/j.cnki.ssstm.20250815.001.
[31] SUN Y, LI L, CHEN Y, et al. An empirical study on innovation ecosystem, technological trajectory transition, and innovation performance[J]. Journal of Global Information Management (JGIM), 2021, 29(4): 148-171.
[32] 彭文波, 余翔. 战略性新兴产业的技术融合与发展趋势——基于中美欧专利的比较研究[J]. 中国科技论坛, 2024(3): 177-188.
[33] 刘玉梅, 温馨, 孟翔飞. 基于技术轨道跃迁的突破性技术预测方法及应用研究[J]. 情报杂志, 2021, 40(11): 39-45, 15.
[34] 张尧, 于丽洁, 王元彬, 等. 新质生产力、供应链深度数字化与企业碳绩效——来自关键数字技术专利的证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(10): 80-93.
[35] HUANG Y, LI R, ZOU F, et al. Technology life cycle analysis: From the dynamic perspective of patent citation networks[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 181: 121760.
[36] 袁野, 黎懿澜, 吴超楠, 等. 基于专利挖掘的数字物流技术领域国际竞争态势与前沿热点研究[J]. 创新科技, 2024, 24(1): 76-91.
[37] 黄颖, 叶冬梅, 丁凤, 等. 技术演化路径识别: 内涵释义与研究进展[J]. 图书情报工作, 2022, 66(22): 142-154.
[38] 侯艳辉, 荆明月, 王家坤. 基于专利异构数据融合的技术演化路径识别方法[J]. 情报杂志, 2024, 43(9): 188-195, 147.
[39] DWIVEDI Y K, SHARMA A, RANA N P, et al. Evolution of artificial intelligence research in *Technological Forecasting and Social Change*:

Research topics, trends, and future directions[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 192: 122579.
[40] 王艳, 苗红, 李欣, 等. 知识基因视角下的技术融合机会发现研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2021, 42(7): 18-34.
[41] 方曦, 彭康, 刘云. 基于技术融合视角的颠覆性专利预测研究[J]. 情报杂志, 2025, 44(5): 139-146, 138.
[42] 李丹, 张文惠, 汪满容. 基于 IPC 及术语多视角融合分析的技术融合态势研究[J]. 情报杂志, 2025, 44(10): 136-143.
[43] 冉从敬, 冯若静, 李旺. 基于专利多属性融合的企业技术竞争对手识别研究——以新能源汽车领域为例[J]. 情报理论与实践, 2025, 48(5): 91-100.
[44] 袁野, 吴超楠, 陶于祥, 等. 关键技术的后发追赶与动态比较——基于人工智能技术生命周期的实证分析[J]. 中国科技论坛, 2022(6): 90-100.
[45] 饶扬德, 邹盈, 刘鹏, 等. 后发企业关键核心技术突破路径研究——以长安汽车发动机技术为例[J]. 科研管理, 2025, 46(11): 42-53.
[46] 尹西明, 陈锋, 吴善超. 技术—组织—场景(TOC): 培育未来产业的新理论[J]. 中国软科学, 2025(9): 42-54.
[47] 孙冰, 鞠卓芳. 从技术锁定判别中寻求技术突破的可能路径——以光刻技术为例[J]. 科学学研究, 2025, 43(6): 1223-1236.
[48] 王金凤, 高科, 赵伟宇, 等. 技术要素跨领域流动与组合的技术机会识别研究[J]. 情报理论与实践, 2025, 48(11): 131-140.
[49] 胡登峰, 黄紫微, 冯楠, 等. 关键核心技术突破与国产替代路径及机制——科大讯飞智能语音技术纵向案例研究[J]. 管理世界, 2022, 38(5): 188-209.
[50] 袁野, 邹桥. 人工智能科技创新与产业创新深度融合: 理论逻辑、实践路径与政策选择[J]. 西南大学学报(社会科学版), 2025, 51(6): 199-210, 282-283.

Competitive Position and Transition Pathways of Key Digital Technologies: A Case Study of Biometric Recognition

Yuan Ye[1,2], Xu Zixin[1], Yin Ximing[3,4]

(1. School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Research Center of Information Industry Cooperation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 3. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. School of Global Governance, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Achieving self-reliance and strength in critical digital technologies is the strategic "opening move" for China to build new advantages in global competition and seize the commanding heights of international rivalry. It also constitutes the decisive "winning move" for fostering new engines of economic growth and building a modern industrial system. Taking biometric recognition as a representative case, the theories of the technology life cycle, technological trajectories, and technological transitions were integrated to elucidate the global competitive landscape, evolutionary life cycle, and transition pathways of key digital technologies. The findings indicate that, in terms of competitive dynamics, the global landscape of key digital technologies is characterized by highly complex and continuously evolving patterns among competing actors. Moreover, the dominant technological trajectories led by Europe, the United States, and other advanced economies impose a certain "cyclical technological lock-in effect" on China's latecomer catching-up efforts. From the perspective of technological trajectory evolution, the development of key digital technologies follows an S-curve pattern. It shows a clear shift from basic research dominated by Europe and the United States toward application-oriented innovation increasingly led by China. Moreover, as global technological competition intensifies, these technologies are evolving from single-modal solutions to integrated multimodal systems. From the perspective of transition pathways, the deep cross-domain integration of diverse technologies, together with the driving force of application contexts, has opened a window of opportunity for China to break through the cyclical technological lock-in in key digital technologies and to realize latecomer catch-up. Overall, it provide a new theoretical framework and practical insights for latecomer countries seeking breakthrough innovation and technological catch-up in key digital technologies.

Keywords: key digital technologies; science and technology powerhouse; trajectory transition; biometric recognition; beyond catch-up; new quality productive forces