

doi. 10. 3724/1005-0566. 20250812

面向智能制造企业关键技术自主化的 数字生态编排策略研究

赵艺璇^{1,2}, 余江^{3,4}, 卢燃^{3,4}

(1. 南京大学信息管理学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京邮电大学社会与人口学院, 江苏 南京 210023;
3. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 4. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100190)

摘要: 智能制造复杂产品的关键技术自主化, 是夯实制造业国产化根基、实现科技自强自立的必由之路。尽管数字生态系统能够为企业技术创新高效聚合外部资源, 但是将其内化为自主创新动能仍是关键挑战。因此, 探索如何优化配置数字生态系统, 在整合资源的同时强化核心技术自研是亟待解决的现实问题。依据组织编排理论, 从“结构—关系”维度提取关键条件, 构建“编排—实现”组态模型, 基于 89 家企业的调查数据开展 fs/QCA 分析发现: 呈现 4 种驱动关键技术自主化的数字生态编排策略, 即集聚共生策略、利基依赖策略、流程转化策略与跨界互补策略。各类策略映射出企业面向不同产业环节的关键技术突破, 需在数字生态架构设计与资源协同配置中构建差异化的结构与关系联动模式。这些策略依次适配于配套工艺类技术的集聚协同、精密加工类技术的错位依赖、组装控制类技术互补以及混合交叉技术类转化, 四类智能制造的典型场景应用。研究结果对提升企业关键技术创新的自主性与可控性, 构建智能制造产业生态发展新格局具有现实意义。

关键词: 数字生态编排; 智能制造企业; 关键技术自主化; 组态研究

中图分类号: F272. 3 文献标识码: A 文章编号: 1005-0566(2025)08-0117-11

Research on digital ecological orchestration strategies for achieving the autonomy of key technologies in intelligent manufacturing

ZHAO Yixuan^{1,2}, YU Jiang^{3,4}, LU ran^{3,4}

(1. School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. School of Sociology and Population, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;
3. Chinese Academy of Sciences Science and Technology Strategy Consulting Institute, Beijing 100190, China;
4. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The key technology self-reliance of intelligent manufacturing of complex products is the only way to solidify the foundation of localization in the manufacturing industry and achieve technological self-reliance. Although digital ecosystems can efficiently aggregate external resources for enterprise technological innovation, internalizing them as independent innovation drivers remains a key challenge. Therefore, exploring how to optimize the configuration of digital ecosystems

收稿日期: 2025-05-24 修回日期: 2025-07-28

基金项目: 国家自然科学基金重大课题项目“数字技术创新机制、突破路径与政策体系研究”(72334007); 国家自然科学基金重大项目课题项目“数字创新驱动的新企业创业模式研究”(72091313); 南京邮电大学引进人才科研启动基金项目“数字生态系统中企业关键技术突破式创新的实现机制研究”(NYY224017)。

作者简介: 赵艺璇(1990—), 女, 贵州遵义人, 南京大学信息管理学院博士后, 南京邮电大学社会与人口学院副教授, 研究方向为技术创新管理。通信作者: 余江。

and strengthen core technology self research while integrating resources is an urgent practical problem that needs to be solved. Based on organizational orchestration theory, key conditions are extracted from the “structure relationship” dimension, and a “orchestration implementation” configuration model is constructed. Based on survey data from 89 enterprises, fs/QCA analysis shows that there are four digital ecological orchestration strategies that drive the autonomy of key technologies, namely agglomeration symbiosis strategy, niche dependence strategy, process transformation strategy, and heterogeneous complementarity strategy. Various strategies map the key technological breakthroughs of enterprises in different industrial sectors, requiring the construction of differentiated structures and relationship linkage models in digital ecosystem architecture design and resource collaborative allocation. These strategies are sequentially adapted to the clustering and collaboration of supporting process technologies, the dislocation dependence of precision machining technologies, the complementarity of assembly control technologies, and the cross-border cross technology transformation, which are typical scenarios for four types of intelligent manufacturing applications. This article has practical significance for enhancing the autonomy and controllability of key technological innovation in enterprises and constructing a new pattern of ecological development in the intelligent manufacturing industry.

Key words: digital ecological orchestration; intelligent manufacturing enterprises; key technology autonomy; configuration research

当前,国际竞争格局重塑,世界经济从开放互联的“全球化时代”逐步迈入“全球碎片化时代”。尤其是智能制造领域,由于技术高度集成、工艺流程跨行业交叉性强,且涉及跨区域空间的实体与数字资源的动态配置,致使整体产业链技术结构高度复杂^[1]。传统制造业全球化中,各国多循“先融入全球价值网络、再凭技术竞争力定产业分工”路径,借技术协作共享创新成果。但是当前地缘政治冲突加剧、贸易保护主义抬头,全球制造业价值链现断裂重构趋势,未来或转向“先强化自主创新、再寻国际互补合作”的“错位发展—嵌入体系”新模式^[2]。因此,我国企业对产业链核心环节关键技术自主可控的强化,成为培育新质生产力、加速推进“再工业化”进程,在全球科技竞争中占据不败之地的必要前提。

现阶段我国智能制造企业的关键技术自主化面临严峻挑战^[3],重点体现在两方面。一是我国制造产业技术创新存在“大而不强、繁而不精”结构性矛盾,虽有海量知识资源却难内化为自研技术体系;精密传动部件、高端传感器等产业链高端核心技术长期受制于人,大量自主创新仍停留在配套型零部件等中低端环节^[3]。二是智能制造复杂产品与以往传统制造业的“基础研究—生产开发—应用转化”的“一体式”工序模式截然不同,其呈现出工艺专业化程度高、产业分工精细

化、产业链条更长、资源配置网络化密集高等特征(如半导体制造产业)^[4]。这一特性使整体产业链呈高度碎片化与模块化,即便企业突破某环节“卡脖子”技术,受智能制造产业链天然复杂性与工序强关联性影响,技术转移和协同中仍易出现“技术断层”与“体系空转”问题^[5]。单一环节的关键技术自主突破,若缺乏上下游配套技术的同步跟进,将难以有效转化为实际生产力,构成技术持续升级与产业迭代的隐性瓶颈。

针对上述问题,国内外研究一致表明,企业可通过构建数字生态系统(digital ecosystem),依托数据化、网络化、智能化为代表的数字创新体系,将上游理论创新、中游试验创新、下游工艺与应用创新,紧密联结起来并实现数据的共享与反馈,加速创新链循环^[5-6],有效破解关键技术创新低端化与断层化难题。这种深度耦合的协同创新模式,不仅显著提升各个节点关键技术自研效率,更推动整体产业链从“松散协作”向“生态共生”转型,为突破核心技术瓶颈、实现自主可控提供新的组织策略^[6-7]。数字生态系统这类新兴组织存在结构冲突,体现在开放性与封闭性的矛盾:一方面,其具有开放性,数字技术能突破传统组织层级刚性,使创新组织拥有资源协作柔性、信息扩散性及资源耦合性优势,助力吸纳多元资源、切入前沿技术实现创新^[8-10];另一方面,其兼具封闭性,企业

可借数字技术(如云计算容器技术)实现技术模块解耦封装与迭代,设置“隔离与开放阈值”管控创新要素流动^[11],但这种数字化闭合可能阻碍创新要素流动(如平台垄断、技术隔离),不利于关键技术突破^[12]。学界认可数字生态系统较传统科层级组织更具组织柔性,但也发现其显著结构性矛盾。作为“人造”架构,它可按需求精准量化编排组织参数,调配外部资源内部转化,实现创新要素精准映射与效能放大,还能形成兼顾封闭与开放的多维度动态耦合弹性架构^[5,12],达成“和而不同”“隔而不离”的关键技术自主化创新目标,是合理利用其组织特性、实现创新资源快速识别整合与内部转化,进而破解相关问题的新思路。但现有研究未明晰面向关键技术自主化目标的数字生态组织编排策略及其“封闭—开放”平衡机制与底层逻辑,更未结合适用场景提供实证证据。这种理论建构与实证检验的双重缺失,导致难以形成可操作性强的实践指导。

综上,本文依据组织编排理论,从组织“结构—关系”互动视角,解构数字生态系统组织架构特征,采用定性(理论构建)与定量(实证检验)相结合的 fs/QCA 方法,挖掘智能制造企业策略性编排数字生态组织结构与关系,以优化资源配置,实现关键技术自主化。由此,提炼企业实现关键技术自主化的数字生态编排策略及其背后的运行机制与逻辑,构建适配智能制造场景复杂产品技术创新的解决方案框架;为后续企业进一步依托具体的数字技术,实施相关策略、落地数字生态组织布局实现技术突破提供理论支持。

一、文献综述与理论分析

(一)文献综述

“智能制造”(intelligent manufacturing)指将信息技术与先进自动化生产技术相结合,支持跨领域、跨工艺的多元企业实现联合生产与集成管控的智能生产模式^[12]。智能制造企业关键技术自主化,是指在这类复杂技术体系的核心架构或关键互补组件环节,通过有效整合外部知识资源,融入现有的技术惯例中,并进一步转化为独立新技术体系的自研过程^[13]。就企业如何实现智能制造复

杂产品的关键技术自主创新,现有文献重点从“主体—工具—价值”维度展开研究。主体视角研究强调复杂产品关键技术的突破并非依赖单一主体完成,需由多类型厂商、政府、中介机构等多边主体协作共创,细化分析了多主体创新能力的多层次互补机制、知识要素的跨领域渗透机制以及竞合博弈动态平衡的协同机制等^[14-16]。工具视角研究侧重分析复杂产品技术自研所需的知识、制度(如政策、知识产权)、商业模式等工具,多基于主体与客体资源互动配置视角,探讨智能制造技术突破对产业升级的显著影响,强调需有效资源与组织工具保障其稳定合规高效实现,体现宏观到微观、抽象到具体的治理逻辑^[15-17]。价值视角的学者则强调关键技术自主化过程中价值导向的内在重要性,并非技术封锁与隔离的二元化零和博弈思维,而是在激发自主独立创新过程中强化多主体的共同参与并形成价值主张多元化。尽管三类视角侧重点不同,但均强调智能制造作为技术密集、工序复杂、多主体深度协作的新兴制造范式,我国企业若想以突破关键技术节点为切入点,推动制造产业结构升级并提升产业链分工中的自主创新力,需向外衍生、联动多边技术主体开展协作。过往研究多聚焦研发外包、技术交易等短期手段整合外部资源,虽能短期满足资源汲取与知识转化需求,但随我国企业向全球价值链高端迈进及逆全球化技术封锁加剧,核心技术获取难度大增。企业技术创新需突破外部资源内化层面,嵌入产业链高端核心环节以实现全链条自主突破,而相关情境下的组织策略、路径与适配场景研究待探明。

数字生态系统是解决多主体协作、资源交互配置及价值共创的重要组织载体,作为“人造组织”,企业可依战略需求融入算法模型、量子计算等数字技术,灵活塑造组织规则与协作模式。既往文献将数字生态系统与技术创新活动联系并开展了丰富探索^[16]。重点剖析了数字生态系统结构性与关系性特征,细化讨论了与传统科层制组织的区别以及更好地驱动或孵化技术创新的新机制^[17-18]。在数字生态结构方面的研究指出,数字

技术的介入使开放包容的生态型组织的连接结构更加多元化,拓宽知识资源获取渠道,削弱甚至消除了传统科层级组织中核心知识资源拦截现象,打破核心技术垄断^[19];在中心度方面,数字技术借分布式自治、通证分权等形成“去中心化”或“多点中心”结构,降低对单一关键技术的依赖;数字生态关系上,企业可通过数字 API 接口灵活耦合与解耦技术组件,提升技术组件拆解的灵活性、协调性、响应度及互动广度深度^[20-21]。区块链等数字加密技术借可溯源机制构建数字生态信任基底,该信任不仅打破时空与人为干预壁垒,还通过可信存证、智能合约机制,实现知识产权确权、流转、保护全流程的规范化优化^[20-21]。

既往研究已论证数字生态系统是企业技术创新的重要组织载体,但存在理论缺口:一是多讨论数字生态系统驱动技术创新活动的作用机制^[18-19],未揭示企业从低端工艺创新向核心技术自主创新跃迁的内在机制;二是多事后刻画分析现有组织状态,缺乏关键技术自主化目标下组织策略的事前设计与操作路径研究;三是多笼统定性讨论,缺乏量化分析结构层与关系层要素的组合、权重及动态互偿机制。本文将挖掘相关数字生态编排策略,揭示要素因果机制与场景适配机理。

(二) 理论分析

智能制造涵盖海量实体设备、复杂工艺流程与数字技术的深度互联,呈现的高度动态性与强连接特性,已超出传统组织的适配范畴,故其技术创新必须依托更契合数字生态系统新型组织载体^[20]。数字生态系统中各主体共生依赖、相互联动,彼此基于外部环境适应及价值主张调整的过程中寻求价值共创的多元策略并非单一最优均衡^[21]。组织编排理论(organizational orchestrate theory)通常被应用于组织设计、资源配置与流程管控中,其核心思想认为企业(尤其是链主企业)基于内部自身需求与外部环境变化,企业进行组织架构的动态调整和有效配置,策略性调整组织结构与主体间关系,加速资源精准配置与价值创新迭代转化,以此激活组织整体的价值创新正反

馈。同理,智能制造企业实现关键技术自主创新,需编排适配数字生态系统的组织架构(含结构层、关系层)。因此,本文依该理论经典框架,结合数字生态组织特征与内涵研究,从数字生态结构编排(中心度、关联度)和关系编排(耦合度、信任度),构建“编排—实现”理论框架。

1. 数字生态关联度与关键技术自主化

数字生态关联度(digital ecological relevance)是指企业利用数字技术(如平台模块、开放 API 接口、数据共享协议等技术手段)连接外部多元主体,各主体资源协同演进发展趋势的一致性(相似或相异)程度^[22-23]。与传统组织依赖核心企业或中介机构占据网络结构洞位置,形成信息垄断与资源控制不同^[24];数字生态组织以网络拓扑结构为基础,各主体均可动态调配与其他主体的关联度,形成多模态的非冗余连接^[25-26],使各方主体精准匹配外部资源,快速响应技术迭代、市场波动及用户需求变化,为技术创新注入柔性调节空间,持续驱动关键技术的自主突破。故纳入整体研究框架。

2. 数字生态中心度与关键技术自主化

数字生态中心度(digital ecological centrality)是指主体通过数字技术广泛连接多元主体,各主体在资源交互过程中相互依赖的程度^[27-28]。该概念突破传统网络中心度以节点度数、中间中心性等静态指标的做法,强调以数据交互频次、资源调度权重、技术标准影响力等动态指标,来衡量主体“价值枢纽”中心程度。当前,提升数字生态中心度对技术创新的作用效应仍存在争议。秉持促进效应的研究认为,数字技术通用性与兼容性可稀释某一主体的中心权限而“去中心化”,释放更多价值空间激活自主创新动力^[29]。与之相反的抑制观则认为,数字技术通过增加信息透明度、完整度,强化集权控制程度,加剧资源路径锁定^[30],不利于企业技术创新自主可控。本文认为其具有两面性,单一强调某方面参考有限,需综合考虑与其他维度的联合效应。

3. 数字生态耦合度与关键技术自主化

数字生态耦合度(digital ecological coupling)是

指创新主体在以数字技术为载体所形成的协作网络中,对其他主体资源需求的即时反馈与响应程度^[30]。与传统社会中依据关系互动频率与时长来表征主体间关系紧密程度的理论内涵不同,在数字生态系统中,各主体间互动关系质量更强调彼此能够响应对方需求的即时程度与支持度^[31]。现有研究认为关键技术自主研发将面临更为显著的知识壁垒与突破既有技术范式的创新压力^[32],提升耦合度能够帮助企业利用数字技术精准化企业间技术合作焦点,增强组织注意力配置能力,挖掘更多技术互补的路径,快速搜寻与链接外部支持^[33-34]。但以 Fichman 等为代表的研究则认为过度耦合的模块部分会导致资源冗余及无关因素干扰,建议解除耦合^[35-37]。综上,本文认为企业可基于不同产品技术创新的知识需求与学科特性,结合数字生态中其他组织的特征,动态调整局部耦合或解耦的策略范围,以实现关键技术自主化的战略目标^[36]。

4. 数字生态信任度与关键技术自主化

数字生态信任度(digital ecological trust)是指创新主体对外部合作伙伴资源能力或履行责任的信心程度。信任通常被视作关系质量的重要指标,其理论内涵虽与传统研究中的关系信任基本一致,但在数字生态中的组织信任实现路径上存

在显著差异^[37]。数字技术的介入使生态型组织更具包容性与开放性,推动海量创新主体与资源汇聚,进而凸显陌生厂商间组织信任的重要性。尽管信息管理领域的研究,基于加密算法等技术解决了数字生态信任的构建问题,可缩短组织间信任评估周期、扩大信任覆盖范围、提升数据共享的透明度,有效缓解信息非对称性引发的信任风险^[38],但亦有研究指出信任度作为一种认知感知因素,本身并不直接产生组织绩效,需与优化组织协作网络,强化能力、资源匹配等因素联合作用才能实现绩效^[39]。因此,企业虽可通过强化数字生态信任推进关键技术自主化进程,但需协同其他要素才能形成实际产出。

5. 多维要素编排与关键技术自主化

现有创新生态研究揭示组织结构与关系要素互动模式影响创新绩效^[40-42]。但缺乏数字生态组织编排的讨论,尤其少见其与关键技术自主创新关联的研究。数字生态呈连接复杂、结构多模态特征,传统组织编排策略难适用,需针对性探索,如算法渗透下企业可改提耦合度获资源、降关联度避技术同质化,而数字生态组织因素互动机制、策略主次仍为理论黑箱。智能制造企业关键技术自主化需“隔而不离”的生态,单一策略难实现,需多维度编排,故本文构建组态分析模型,如图1所示。

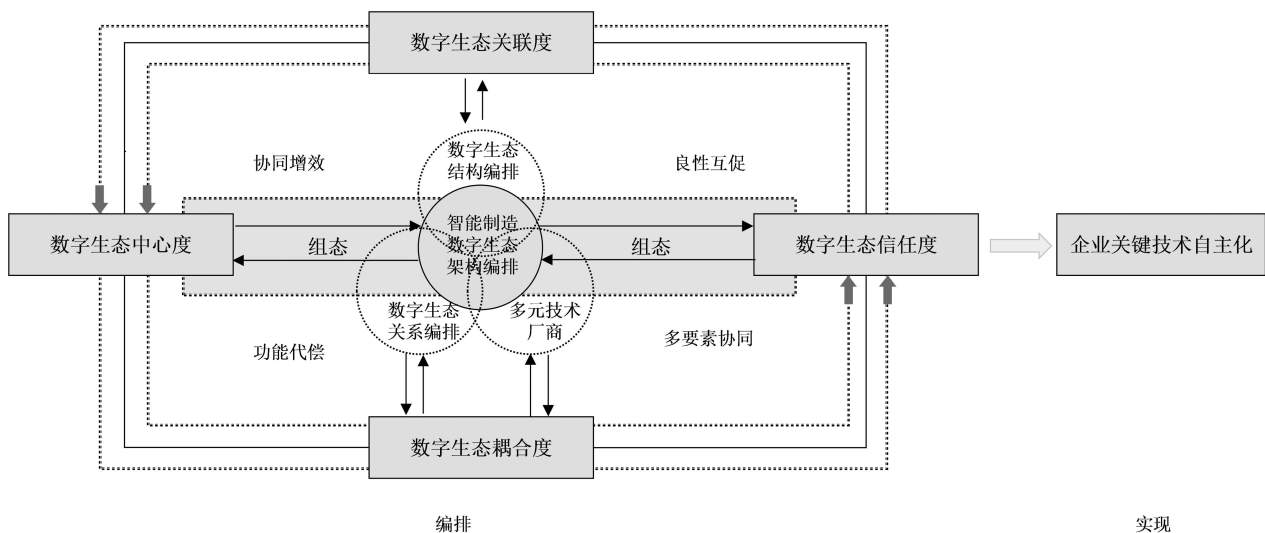


图1 面向关键技术自主化的数字生态编排的理论模型

三、研究设计

(一) 研究方法

选择 fs/QCA 方法原因如下:①企业数字生态编排是多要素叠加的综合策略,需避免孤立分析单一因素,而 fs/QCA 依布尔代数集合论法则,可在复杂要素组合中识别有效构型;②本文研究智能制造企业关键技术自主化样本细分行业差异大,变量关系与模型设置复杂,fs/QCA 减缓样本差异大、模型烦琐导致的回归偏误风险;③该方法适合中小样本实证,可规避多重共线性与反向因果引发的内生性问题,缓解新兴研究数据样本有限的困境。

(二) 样本选择与数据测度

1. 样本选择

样本的筛选遵循以下原则:①典型性原则,入选企业被纳入当地政府智能制造名单;②数据可获得性原则,结合样本调研数据的可获得性,所选企业样本与本研究相关课题合作企业参与到各项实地调研中;③样本代表性,在要求整体样本符合研究主题基础上,为提升研究结论普适性,尽可能最大化样本个体差异,涵盖机械制造、电子元器件制造、新能源材料制造等不同领域的制造行业企业样本。具体样本特征的描述性统计见表 1。

表 1 企业样本特征的描述性统计 (N = 89)

维度	分类	样本/个	占比/%	维度	分类	样本/个	占比/%
企业成立年限(年)	< 10	15	16.85	研发投入强度(研发投入占销售总收入的百分比%)	< 1	16	17.98
	11 ~ 30	38	42.70		1 ~ 8	58	65.17
	> 30	36	40.45		> 8	15	16.85
企业性质	国有企业	38	42.70	企业规模(员工人数/人)	< 500	29	32.58
	民营企业	51	57.30		501—1 000	38	42.70
企业所属行业	生物制药业	34	38.20		> 1 000	22	24.72
	机械制造业	37	41.57	所在地区	东部地区	56	62.92
	电子元器件制造业	10	11.24		南部地区	14	15.73
	新能源材料业及其他	8	8.99		中部地区	19	21.35

2. 数据测度与来源

考虑到企业实施数字生态编排策略行为具有一定主观性,二手数据无法完全体现其理论内涵。因此,本文采用主观问卷数据与客观文本分析数据匹配的数据处理方式。①问卷数据:利用五级李克特量表(5 分为非常同意,1 分为非常不同意)。量表题项源于成熟量表,结合数字生态系统特征,对表述进行修改。严格按照量表题项设置的流程进行专家咨询、预调研、团队研讨等,正式问卷调查集中于 2023 年 6 月—11 月,2024 年 1 月—3 月,共发放问卷 150 份,剔除明显填答错误或填答时间较短的问卷,有效回收问卷 89 份(每个企业填答一份,主要由中高层管理者、研发负责人等填答),问卷有效回收率为 59.3%。②文本数据,主要根据专利申请数量以及专利标准制定数量表征企业在该技术领域实现关键技术自主化程度,专利数据库主要来自智慧芽平台,根据问卷调

查企业的名称对应匹配相应专利数据。具体数据测度与来源见表 2。

3. 变量校准

fs/QCA 组态分析方法依据布尔代数运算方法,计算对象是集合数据而非连续数值型数据。按照 Fiss 运算方法^[43],需在分析前对数值数据进行校准,以便于集合运算。校准锚点的选择需综合考虑所收集的数据特征及其变量情况,本文校准数据参考问卷数据校准的主流做法,采用李克特五级量表的 5、3、1 作为完全隶属点、交叉点和完全不隶属点的校准锚点进行校准。原因在于:本文研究数据来源于问卷数据,李克特五级量表在题项测量过程中已经对数据的程度进行了区分。此外,关于数字生态编排策略的实施程度尚且缺乏明确的通用标准,不同程度的数字生态编排效果是基于样本企业特征的相对性指标。因此,本文采用李克特五级量表作为直接校准的锚点能呈现变量水平的相对位置。

表 2 测度方式与数据来源

类型	条件名称	测度方式	数据来源	参考文献
前因条件: 数字生态 编排策略	关联度	利用数字技术桥接多元创新主体形成知识嫁接;衍生多元创新联动模式;快速搜寻潜在合作伙伴;跨行业建立潜在联系 4 类题项	问卷调查:主要依托课题合作、校企联合博士后流动站等。主要采用“滚雪球”的收集方式。	Singal ^[45]
	中心度	利用数字技术强化对互补主体的控制力与协调力;扩大影响范围吸纳更多主体参与;快速提升核心地位与市场影响力;中心权力与“数据租金”提升等 4 类题项		Nambisan 等 ^[48]
	耦合度	利用数字技术建立统一技术接口标准,协调外部联系;剥离低效业务模块而不影响其他合作;精准匹配多源异构的知识资源、创新能力与价值主张;实时反馈需求并获取解决方案等 5 类题项		Brynjolfsson 等 ^[46]
	信任度	利用数字技术拓宽可信任范围;提高信任伙伴甄别效率;透明化,即时化合作伙伴财务、法律等义务履行信息反馈;通过数据分析评估对合作方履责信心等 5 类题项		Bojovic ^[47]
结果条件: 智能制造 企业关键技术 自主化	关键技术 自主化	依据工业和信息化部与国家标准委联合发布的《国家智能制造标准体系建设指南(2024 版)》中智能制造关键技术领域,对应归类的样本企业专利申报文本。运用机器学习算法(TF-IDF 模型)词频分析,评估专利文本中的情感倾向特征,以 1~5 分测度企业关键技术自主研发程度	企业专利文本数据来源于:智慧芽(Patsnap)合享智慧(incoPat)索意互动(Patentics)。	李丹等 ^[41]

四、分析结果

(一)条件必要性检验

在进行组态分析前,为避免无效变量被作为逻辑余项而剔除,需对条件变量进行必要性检验。当前因条件变量的一致性水平高于 0.9 时,即可判定为必要性条件,反之则非必要条件。表 3 全样本单个前因条件必要性检验显示,单一前因变量的必要性与一致性结果均普遍低于 0.8,表明无任何一个条件可独立成为企业实现高/非高程度关键技术自主化的必要条件。

表 3 全样本单个前因条件必要性检验

前因条件	高程度关键技术自主化		非高程度关键技术自主化	
	一致性	覆盖度	一致性	覆盖度
	数字生态关联度	0.645	0.611	0.625
~数字生态关联度	0.575	0.603	0.592	0.628
数字生态中心度	0.660	0.620	0.628	0.597
~数字生态中心度	0.571	0.603	0.601	0.641
数字生态耦合度	0.648	0.649	0.567	0.574
~数字生态耦合度	0.575	0.568	0.653	0.652
数字生态信任度	0.626	0.624	0.535	0.554
~数字生态信任度	0.566	0.547	0.655	0.639

(二)组态分析

组态分析的核心思想强调一切事物间的作用关系并非因果取反^[44-45]。因此,通过 fs/QCA 方法识别产生高程度关键技术自主化与非高程度关键技术自主化的数字生态编排策略的组合方案,并对条件组态中所呈现的核心与边缘配置关系进行定性分析,以深化理论解释。

1. 高程度关键技术自主化的数字生态编排策略

研究发现,可有效驱动企业实现高程度关键技术自主化的数字生态编排策略有 4 类,按照样本组间区分,L1 与 L2 的核心条件均为数字生态结构编排型,L3 与 L4 的核心条件均为数字生态关系编排型,都归为在数字结构编排型下产生高程度关键技术自主化的二阶等价组态,见表 4。

表 4 组态分析结果

前因条件	高企业关键技术自主化				非高企业关键技术自主化	
	L1	L2	L3	L4	NL1	NL2
数字生态结构编排	关联度	●	●		●	⊗
	中心度		●	●	⊗	⊗
数字生态关系编排	耦合度	⊗		●	●	⊗
	信任度	●	●	●	●	⊗
一致性	0.612	0.743	0.604	0.752	0.948	0.953
原始覆盖度	0.351	0.601	0.027	0.457	0.365	0.312
唯一覆盖度	0.215	0.348	0.281	0.084	0.161	0.081
总体解的一致性	0.743				0.936	
总体解的覆盖度	0.629				0.554	

注:●代表核心条件;●代表边缘条件;⊗代表核心条件缺失,⊙代表边缘条件缺失,空白代表该条件可有可无,对结果变量的影响力较弱。此外,无耦合条件即为解耦,无中心条件代表去中心化。

(1)集聚共生策略(L1)

组态 L1 策略旨在编排一个裂变式生态架构,包括强化关联度、降低耦合度(即解耦)为核心条件,提升信任度为边缘条件。这类策略主要覆盖的案例样本涉及机械、材料加工企业,且技术专利样本多为配套零部件或辅材制造工艺类。一是外显化,企业借数字技术(如工业互联网平台)打破

厂商边界,形成分布式弱连接,提升异质工艺衔接兼容度,实现知识显性共享与工序灵活重组;二是内隐化,叠加解耦与提信任度策略,助力技术单元互学隐性知识并转化为创新知识,催生多元技术方案。该策略适用于促进零部件配套工艺集聚兼容,以实现关键技术自主创新。

(2) 利基依赖策略(L2)

组态 L2 策略旨在编排一个分布式生态架构,包括提升中心度为核心条件,增强信任度和关联度为边缘条件。这类策略涵盖的案例样本为生物医药与电子元器件制造企业,涉及专利多为药品、医疗器械精密加工类技术。一是隔离化,借数字隔离技术(如访问控制技术)弱化合作厂商技术趋近性,分流趋同知识元素,减少知识过度迭代致技术同质化,维持知识自主创新内生动力;二是依赖化,将离散独特利基技术节点聚合为自主创新中心枢纽(如分布式共识算法),形成多中心分布式自治又互依的结构,强化个体隐性知识与自研能力并形成互补组合。该策略适用于培育精密加工类技术及构建有效组合。

(3) 流程转化策略(L3)

组态 L3 策略旨在编排一个组合式生态架构,包括增强耦合度为核心条件,提升中心度与信任度为边缘条件,这类策略涵盖的案例样本为机械、生物医药及电子元器件制造等企业样本,涉及专利多以产品组装与流程控制技术为主。一是联动化,企业借数字耦合技术(如多媒介传输技术)优化跨厂商资源匹配、需求分类及响应反馈全链路闭环,加速新技术试错迭代;二是流转化,以数字技术(如算法改进)实现技术流程去中心化,柔性化工序并按需拆解组合;三是提升信任度保障合作稳定。该策略适用于智能制造中需灵活改进工序、自主控制流程的技术创新需求。

(4) 跨界互补策略(L4)

组态 L4 策略旨在编排一个混合式生态架构,包括增强信任度、降低中心度为核心条件,提升耦合度与关联度为边缘条件,这类策略涵盖机械、材料及电子元器件等企业样本,自研专利内容多涉及跨行业交叉技术创新。一是去中心化,企业下

放技术自研权限,推动各主体建多点分散技术中心,汇聚跨行业创新资源;二是弱化耦合度,剥离过往研发合作模块。研究发现,场景创新实现关键技术自主突破,需借数字技术分化厂商技术同质内卷、降低知识元素关联度——既要建跨领域技术兼容接口,又要避免过度兼容致同质化。该策略相关四类数字生态编排组态逻辑(见图3)。

2. 非高程度关键技术自主化的数字生态编排策略

为保证前因组态的可靠性,本文检验产生非高程度的关键技术自主化组态的因果非对称性,分析形成非高程度的关键技术自主化的数字创新生态编排前因条件。组态 NL1 表明,若数字生态编排仅强化关联度,缺乏耦合度、中心度与信任度,难以达成自主创新的战略目标;组态 NL2 表明,数字生态编排策略所有要素缺乏时,无法支持关键技术自主化,侧面印证了企业仅嵌入某一场域的数字生态系统中,如若不能策略性地实施组织编排与调控策略,难以实现关键技术自主可控。

3. 组态路径对比

对比组态 L1 和 L2 路径,发现两者都将数字生态编排的重心战略放在调整结构维度,强化关联度与解除耦合度,等效于以提升中心度为主,以强化关联度为辅。该路径的替换关系印证了 Nambisan 等^[46-48]强连接“过犹不及”的观点,即过度中心集聚与紧密关联并不能产生有效耦合,因而难以得到合作厂商的即时响应,其效果与解耦等同。对比 L3 和 L4 路径,发现两类组态都将策略设计的重心放在调整数关系层编排,但匹配条件要素不同。此外,需要特别注意的是,四类组态都以强化信任度为条件出现,表明关键技术突破离不开构建高信任度的数字生态合作。

五、研究结论与启示

(一) 研究结论

(1) 企业关键技术自主化有四类数字生态编排策略,适配智能制造复杂产品体系不同环节技术突破:配套零部件工艺类靠“集聚共生策略”重构技术分支组合、变革工艺;核心器件精密加工类借“利基依赖策略”汇聚外部知识并内化,实现核心技术可控;组装控制类凭“流程变革策略”重构技术模

块嵌入与工序关系,加速知识扩散;混合交叉类技术创新用“跨界互补策略”结合场景显性知识与自身隐性知识迭代创新。四类策略体现“殊途同归不同效”逻辑,表明智能制造关键技术自主化需动态匹配数字生态组织载体,实现整体跃迁。

(2)企业可借多元数字技术,调节数字生态结构层与关系层要素权重,落地四类编排策略以推动智能制造全链条关键技术自主创新。研究显示,数字生态结构层(中心度、关联度)与关系层(耦合度、信任度)的内涵、机理异于传统组织,其交互组合催生不同效能。四类策略调控逻辑各有侧重,对应裂变式、分布式、混合式、组合式架构:前两者以调整结构为重心,破技术惯例,促原理性技术自主创新;后两者以优化协作模式为核心,塑关系缓冲带,推程序性技术自主创新。

(二)理论贡献

第一,本文基于智能制造情境对数字生态编排策略的讨论,拓展组织编排理论的应用边界,增强对企业关键技术自主化背后组织载体作用机理的解释。以往组织编排研究多关注科层级组织架构调整策略研究,如混合所有制国有企业结构编排等^[47],少量学者探索了创新生态系统组织编排^[48]。本文关注智能制造情境,将研究视角拓展到数字生态编排,丰富结构与关系编排各维度的新内涵、特征及其叠加作用机理,并将其与关键技术自主化联系起来,深化了智能制造复杂产品技术突破的新思路与新路径,提供新的解释视角。

第二,本文突破组织事后状态研究局限,以组织设计可塑性的动态视角构建“编排—实现”组态框架,探索数字生态结构层与关系层各维度编排策略,为企业用数字技术干预组织治理提供可验证的理论框架与量化支撑;打破单一要素平均效应视角,从多要素叠加视角挖掘各维度“核心—边缘”匹配度,结合案例特征揭示数字生态编排助力企业实现“配套零部件—核心部件”(原理性技术)、“组装控制—混合交叉”(程序性技术)全流程关键技术自主化的策略组合与作用机理,明晰不同智能制造关键技术突破的组织配置机制差异。

第三,本文识别并对比了4条数字生态编排策

略的异同,揭示其实现关键技术自主化的主导逻辑。研究聚焦数字生态编排条件、组合逻辑与路径特征,发现各路径存在“结构重塑”与“关系适配”并重的特征,不同组态路径隶属不同主导逻辑。区别于传统创新生态系统笼统强调的开放性逻辑^[49-50]。本文立足智能制造企业微观实践与国际技术脱钩的宏观背景,提出利用数字技术构建“隔而不离”的适度耦合型组织架构,强调打通外部显性知识内隐化的组织路径以及权衡好各类知识元素的兼容趋同性与创新差异性之间组织管控,为实现从被动嵌入某一技术体系到主动主导技术变革的自主创新,深化与发展现有理论认知。

(三)实践启示

对企业管理者而言,需在借数字技术开源知识共享时,合理评估匹配技术工具的组织效用(如提耦合度、降中心度/关联度),形成差异化数字生态架构,助力各环节技术自主创新。具体来看,若开展配套零部件、核心部件等原理性技术创新,需重视技术组织结构性突破,用集聚共生、利基依赖策略解耦或降关联度,避知识趋同以激发多元技术方案,如我国自主研发 EUV 单晶圆技术替代受限的芯片纳米级光刻技术;若开展组装流程、场景工序重组等程序性技术自研,可借流程转化、跨界互补策略,通过强化耦合度与降低重心度等搭配,形成“部分隔离性”半开放协作关系,灵活拆解组合工序以实现场景与流程创新,如将磁流变液工艺嵌入机械轴承加工攻克曲面抛光瓶颈。

对政府管理者而言,需在宏观层面统筹数字技术生态建设,借政策引导与资源调配为企业关键技术自主创新营造有利环境。一方面,可制定差异化产业政策,构建“梯度化数字生态培育体系”:为不同领域智能制造技术攻关定制政策服务包,如搭建含开放数据接口、共享知识库等的基础培育平台,降低企业构建数字生态成本;主导制定基础技术协议与数据交换标准,建立行业数字身份认证与信用体系,助力企业跨主体安全信任与互访,激发创新活力。另一方面,鉴于智能制造技术创新特征及传统架构局限,需赋予企业更大自主空间、下放创新权限,支持企业依核心能力与产业链

定位灵活选伙伴、定技术接口标准,保障其按技术突破需求弹性实施数字生态编排策略。此外,针对技术创新高风险等特征,配套建立“容错机制”与“兜底机制”,为企业长期创新提供制度保障。

(四) 研究局限与展望

本文研究的具有以下局限性,以期持续探索。一是虽借鉴成熟量表设计问卷并开展 QCA 分析,试图弥补数字生态编排策略量化研究的不足,但问卷样本有限及填答者主观性,仍可能影响研究结论的普适性;二是未考虑不同产业链环节、不同生态位(如链主企业、初创企业)的企业,因与创新主体存在跨层级技术互动(同维—升维—降维),其数字生态编排策略会有差异,未来可针对此展开研究,以全面揭示相关组织逻辑与机制。对此,未来研究可进一步探索,以全面洞察企业关键技术自主化数字生态编排的组织逻辑与机制。

参考文献:

- [1] 庄芹芹,王颖,韩龙艳. 面向科技自立自强的中国科技体制改革逻辑与实践突破[J]. 中国软科学,2024(9):69-79.
- [2] 张化尧,叶晨莹,孟好,等. “断链”冲击、数字赋能与技术的系统性涌现:基于四个芯片制造企业的发现[J/OL]. 科学学研究,1-14[2025-04-29].
- [3] 武建龙,李粉,鲍萌萌. 大国重器如何实现关键核心技术突破?:基于创新生态系统的适应性演进[J/OL]. 科学学研究,1-16[2025-04-29].
- [4] 赵艺璇,余江,彭密香,等. 数字创新生态可供性影响跨界创新的组态研究[J]. 科研管理,2024,45(12):133-141.
- [5] 刘洋,董久钰,魏江. 数字创新管理:理论框架与未来研究[J]. 管理世界,2020,36(7):198-217.
- [6] NAMBISAN S, WRIGHT M, FELDMAN M. The digital transformation of innovation and entrepreneurship: progress, challenges and key themes [J]. *Research policy*, 2019, 48(8):103-173.
- [7] CIRIELLO R F, RICHTER A, SCHWABE G. Digital innovation[J]. *Business & information systems engineering*, 2021, 60(6):563-569.
- [8] 冉佳森,肖静华. 基于数字生态系统的企业跨界服务创新:一项行动研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版),2025,24(1):75-85.
- [9] 董媛媛,姚行瑞. 数字创新生态系统价值共创路径研究:基于 GT-IsQCA 的混合方法[J]. 研究与发展管理,2025,37(2):43-57.
- [10] 吴小节,马美婷,汪秀琼. 智能制造研究述评[J]. 研究与发展管理,2023,35(6):32-45.
- [11] 赵彬彬,梅亮,陈凯华,等. 创新链产业链融合的内涵解析、影响因素和优化路径:基于创新过程与创新系统整合视角[J]. 中国软科学,2025(2):26-39.
- [12] KOHLI R, MELVILLE N P. Digital innovation: a review and synthesis[J]. *Information systems journal*, 2019, 29(1):200-223.
- [13] 范旭,刘伟. 中国光纤产业关键核心技术自主可控实现之路[J]. 科学学研究,2022,40(10):1767-1777.
- [14] ZHANG A, ZHU H, SUN X. Manufacturing intelligentization and technological innovation: perspectives on intra-industry impacts and inter-industry technology spillovers [J]. *Technological forecasting and social change*, 2024, 20(4):123-138.
- [15] DAYMOND J, KNIGHT E, RUMYANTSEVA M, et al. Managing ecosystem emergence and evolution: strategies for ecosystem architects[J]. *Strategic Management journal*, 2023, 44(4):1-27.
- [16] PETERSON M F. Embedded organizational events: the units of process in organization science [J]. *Organization science*, 1998, 9(1):16-33.
- [17] NAMBISAN S, LYYTINEN K, MAJCHRZAK A, et al. Digital innovation management: reinventing innovation management research in a Digital World[J]. *MIS quarterly*, 2017, 41(1):223-238.
- [18] WILLIAMS T, ZHAO E Y, SONENSHEIN S, et al. Breaking boundaries to creatively generate value: the role of resourcefulness in entrepreneurship [J]. *Journal of business venturing*, 2021, 36(5):125-138.
- [19] HANELT A, BOHNSACK R, MARZ D. A systematic review of the literature on digital transformation: insights and implications for strategy and organizational change[J]. *Journal of management studies*, 2021, 58(5):1159-1197.
- [20] 张媛媛. 关键核心技术自主可控如何实现[J]. 人民论坛,2020(16):58-59.
- [21] 焦豪,王林栋,王楠,等. 数字平台生态系统中互补者产品策略对经营绩效的影响研究:基于平台治理的调节效应[J]. 南开管理评论,2025,28(7):29-40.
- [22] NIE L B, LAI X, ZHOU Q, et al. Theoretical logic and implementation path of double chain integration driven by technical standards [J]. *Scientific research*, 2025(10):1-15.

- [23] SIRMON. Competitive advantage: breadth, depth, and life cycle effects[J]. *Journal of management*, 2011, 37(5): 1390-1412.
- [24] LYYTINEN K, YOO Y, BOLAND JR R J. Digital product innovation within four classes of innovation networks [J]. *Information systems journal*, 2016, 26(1):47-75.
- [25] CANHOTO A I, QUINTON S, PERA R, et al. Digital strategy aligning in smes; a dynamic capabilities perspective [J]. *Journal of strategic information systems*, 2021, 30(3): 101-182.
- [26] 徐妍, 毕梦潇, 柴映. 数实融合提升关键核心技术领域企业创新效率的研究: 基于中国 A 股上市公司的数据检验[J/OL]. *科研管理*, 1-18[2025-04-29].
- [27] 蔡怡然, 刘庆龄, 曾立. 关键核心技术创新赋能新质生产力发展: 内在机理、重要环节、外部支撑[J]. *中国科技论坛*, 2025(4): 43-52.
- [28] ERIKSSON E, HELLSTRÖM A. Multi-actor resource integration; a service approach in public management [J]. *British journal of management*, 2021, 32(2): 456-472.
- [29] KOHLI R, MELVILLE N P. Digital innovation: a review and synthesis[J]. *Information systems journal*, 2019, 29(1): 200-223.
- [30] 范旭, 刘伟. 中国光纤产业关键核心技术自主可控实现之路[J]. *科学学研究*, 2022, 40(10): 1767-1777.
- [31] TIM Y, PAN S L, BAHRI S, et al. Digitally enabled affordances for community-driven environmental movement in Rural Malaysia [J]. *Information systems journal*, 2018, 28(1): 48-75.
- [32] DOE J, SMITH J. Ecosystem orchestration; unpacking the leadership capabilities of anchor organizations in Nascent Entrepreneurial Ecosystems [J]. *Journal of business venturing*, 2020, 35(2): 101-115.
- [33] BRUNSWICKER S, SCHECTER A. Coherence or flexibility? the paradox of change for developers' digital innovation trajectory on open platforms[J]. *Research policy*, 2019, 48(8): 1-16.
- [34] GEBAUER H, FLEISCH E, LAMPRECHT C. Growth paths for overcoming the digitalization paradox [J]. *Business horizons*, 2020, 63(3): 313-323.
- [35] BELTAGUI A, ROSLI A, CANDI M. Exaptation in a digital innovation ecosystem; the disruptive impacts of 3D printing[J]. *Research policy*, 2020, 49(1): 103-133.
- [36] 余江, 孟庆时, 张越, 等. 数字创新: 创新研究新视角的探索及启示[J]. *科学学研究*, 2017, 35(7): 1103-1111.
- [37] FICHMAN R G, DOS SANTOS B L, ZHENG Z E. Digital innovation as a fundamental and powerful concept in the information systems curriculum [J]. *MIS quarterly*, 2014, 38(2): 329-353.
- [38] GALBRAITH J. The multi-dimensional and reconfigurable organization [J]. *Organizational dynamics*, 2010, 39(2): 115-122.
- [39] LYYTINEN K, YOO Y, BOLAND JR R J. Digital product innovation within four classes of innovation networks [J]. *Information systems journal*, 2016, 26(1): 47-75.
- [40] AMIT R, HAN X. Value creation through novel resource configurations in a digitally enabled world [J]. *Strategic entrepreneurship journal*, 2017, 11(3): 228-242.
- [41] 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: 以生物芯片领域为例[J/OL]. *情报杂志*, 1-8[2025-06-24].
- [42] GÜNTHER W A, MEHRIZI M H R, HUYSMAN M, et al. Debating big data: a literature review on realizing value From Big Data [J]. *Journal of strategic information system*, 2017, 26(3): 191-209.
- [43] FISS P C. Building better causal theories: a fuzzy set approach to typologies in organization research [J]. *Academy of management journal*, 2011, 54(2): 393-420.
- [44] 武建龙, 董阔, 杨仲基, 等. 场景驱动企业颠覆性创新的作用机制研究: 基于创新生态系统视角的双案例分析 [J]. *中国软科学*, 2024(10): 164-174.
- [45] SINGAL A K. Designing platform ecosystems for collaboration, innovation and growth [J]. *Benchmarking: an international journal*, 2022, 29(9): 2806-2821.
- [46] BRYNJOLFSSON E, WANG C, ZHANG X. The economics of IT and digitization: eight questions for research [J]. *MIS quarterly*, 2021, 45(1): 473-477.
- [47] BOJOVIC N. Strategic framing of enabling technologies: insights from firms digitizing smell and taste [J]. *Research policy*, 2022, 51(3): 104-169.
- [48] NAMBISAN S, LYYTINEN K, YOO Y. Digital innovation: towards a transdisciplinary perspective [J]. *Handbook of digital innovation*, 2020, 23(7): 2-12.
- [49] 陈光沛, 魏江, 杨升曦, 等. 混合所有制改革背景下国企如何应对制度逻辑冲突: 基于金字塔结构的隔板式治理 [J]. *南开管理评论*, 2025, 28(4): 4-15.
- [50] GALBRAITH J. The multi-dimensional and reconfigurable organization [J]. *Organizational dynamics*, 2010, 39(2): 115-122.

(本文责编: 默 黎)