

人工智能嵌入如何推动创新链布局重构*

——基于“卡脖子”技术视角的实证检验

庞磊¹ 焦世杰¹ 李正彪²

(1. 云南师范大学经济学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南财经大学商学院, 云南 昆明 650221)



内容提要:数字经济时代,人工智能嵌入逐渐成为推动创新链布局重构的重要路径。本文从“卡脖子”技术视角出发,系统探讨人工智能嵌入如何推动创新链布局重构及其价值延伸的内在机制与路径。基于2013—2023年中国35个行业的面板数据,本文构建了人工智能嵌入程度、要素空间融合效率、产业技术协同效率及创新链布局重构效能等指标,并采用多种计量方法检验人工智能嵌入的直接效应、间接效应及异质性影响。研究发现,人工智能嵌入通过优化资源配置、提升技术协同效率和促进要素空间融合,显著推动“卡脖子”技术创新链布局的前端集聚、中介协同和后端延展;其对资本密集型和技术密集型产业的重构效能最强,而对劳动密集型产业表现出抑制效应;区域要素市场发达程度和行业技术属性显著影响嵌入效能。此外,人工智能嵌入显著延长创新链价值延伸长度,但在宽度拓展中受制于技术扩散边际效应递减和跨领域协同瓶颈。据此,本文提出应通过加强人工智能嵌入的技术创新、产业协同与区域融合,全面提升关键核心技术创新链的布局重构效能与价值延伸水平。本研究为进一步破解“卡脖子”技术瓶颈、构建自主可控创新链体系提供了理论依据与政策启示,也为中国核心创新体系效能稳步提升提供新思路。

关键词:创新链 人工智能嵌入 “卡脖子”技术 布局重构 价值延伸

中图分类号:F426 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2025)03—0026—21

一、引言

创新链布局是创新驱动发展战略持续深化的关键所在。近年来,国际地缘政治冲突、高端产业保护主义持续升温,关键技术创新链“堵链断链”风险加剧,生产技术更新迭代和产业链分工整合引致创新链关键核心技术溢出受阻,海外技术资源离岸脱钩使得中国“卡脖子”技术创新链由科技迭代期转变为布局重构期。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出,“制定科技强国行动纲要,健全社会主义市场经济条件下新型举国体制,打好关键核心技术攻坚战,提高创新链整体效能”的具体要求。由此可见,通过创新链布局重构实现价值延伸成为“十四五”时期的重要发展战略。同时,在当今全球科技竞争愈发激烈的背景下,中国在众多高科技领域取得了显著进展,但仍面临较为严重的创新链“卡脖子”技术问题,即核心技术

收稿日期:2024-05-21

* **基金项目:**国家社会科学基金后期资助项目“数字经济提升中国产业链安全性稳定性的实践与路径研究”(23FJYB012);国家社会科学基金一般项目“新质生产力推动我国产业链优化升级的机制与路径研究”(24BJL095)。

作者简介:庞磊,男,副教授,硕士生导师,研究领域为世界经济与技术创新,电子邮箱:panglei719@126.com;焦世杰,男,研究助理,研究领域为人工智能与产业发展,电子邮箱:1980493587@qq.com;李正彪,男,教授,博士生导师,研究领域为数字经济与公司治理,电子邮箱:lzb7154@163.com。通讯作者:焦世杰。

和关键环节受制于人。同时,国际经贸摩擦迭加地缘政治冲突风险动态演进,外部环境不确定性增加、大国博弈日趋激烈,使得创新链呈现重组与外移的结构性选择问题,“卡脖子”技术创新链遭遇外部冲击,将引致经济发展的系统性风险。因此,为了实现关键技术创新链价值延伸,中国如何推动创新链布局重构?人工智能嵌入提供了一个新思路。

随着数字技术的快速发展,人工智能嵌入为推动创新链布局重构提供了可能性。人工智能生产内容嵌入关键技术产业研发、生产、运输与销售各个环节,借助生成式模型,整合数据要素各类应用场景,推动创新链各环节数据要素合理配置,重构关键技术创新链布局,提升创新链跨界耦合联动效率,拓展创新链关键环节技术突破路线,促进关键技术创新链生产方式、流通路径与销售模式迭代升级,实现创新链布局重构的靶向突破与价值延伸。同时,数智企业的人工智能嵌入推动中国关键技术创新链各个节点数智化、扁平化、精简化转型升级,促进关键领域数智企业的核心技术创新由单一化人力生产向数智化柔性制造转变,加快新质生产力与创新链各个数智企业节点深度融合,进一步构建数智企业新模式、新业态,以及新形势下的关键核心技术创新链,赋能“卡脖子”技术节点纵横交互、协调联动、前后对接下的创新链布局重构。工业和信息化部数据显示,截至2024年,中国人工智能企业数量已超4500家,核心产业规模接近6000亿元,用户规模达2.49亿人,占整体人口的17.7%,人工智能产业快速发展。这表明,人工智能嵌入已成为破解“卡脖子”技术瓶颈、激发自主创新活力、推动国家创新体系整体效能提升的关键动力。因此,数字经济时代人工智能嵌入以何种路径推动关键技术创新链布局重构?沿着这一思路,聚焦中国“卡脖子”技术创新链视角,本文深入探究人工智能嵌入推动创新链布局重构问题。

学者们围绕人工智能嵌入与创新链布局重构的特征事实(陈东和秦子洋,2022)^[1]、变化趋势(姚加权等,2024)^[2]及风险剖析(王林辉等,2022)^[3]等诸多方面进行了定性讨论,探讨了人工智能嵌入影响创新链布局重构的效应识别(宋华等,2024)^[4]、机制理解(Tian等,2023)^[5]与路径选择(Zhong等,2024)^[6]等,提出了人工智能嵌入融合实体经济推进创新链耦合协同,实现高精尖领域关键环节自主可控的具体路径,为人工智能嵌入推动创新链布局重构问题奠定了理论基础。然而,现有研究多为宏观、中观理论层面的探讨与说明,缺乏对创新链布局重构的微观探讨,未从定量角度测度人工智能嵌入对创新链布局重构的影响程度。因此,基于已有研究现状,聚焦人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构问题,实证测度人工智能嵌入对“卡脖子”技术创新链布局重构的直接推动作用,人工智能嵌入通过要素空间融合与产业技术协同对创新链布局重构的间接推动作用,以及人工智能嵌入对创新链价值延伸的推动作用,旨在为推动关键技术创新链布局重构探寻更优实践路径。

本文的边际贡献主要有:第一,基于人工智能嵌入低边际成本、强渗透性和融合性等特征,以及人工智能嵌入在研发层面对创新链数字化转型、智能化改造与数智化融合的促进作用,从创新链前端、中端和后端三个维度构建创新链布局重构效能指标,测度创新主体与高技术产能在创新链各个环节的研发应用“合力”,为创新链布局重构相关研究提供数据支撑;第二,将人工智能嵌入这一颠覆性技术创新纳入推动创新链布局重构的分析框架,系统研究人工智能嵌入推动创新链布局重构效能提升的直接、间接作用及异质性影响,为人工智能嵌入助推创新链布局重构提供理论支持和经验证据;第三,深入挖掘人工智能嵌入推动创新链布局重构的传导渠道,从创新要素空间融合与创新产业技术协同两个途径进行验证,并对人工智能嵌入推动创新链价值延伸进行拓展分析,将研究视角从技术创新赋能深入至产业价值实现层面,为人工智能背景下推动创新链布局重构及其价值延伸提供路径参考。

二、文献综述

人工智能嵌入与互联网、大数据等产业深度融合,赋能创新链布局重构。然而,发达国家不断加深核心科技的“技术垄断”“标准规锁”与“联盟割裂”,引致中国“卡脖子”技术创新链关键环节失衡。故而,利用人工智能嵌入推动创新链布局重构十分必要。据此,学者们进行了以下三个方面的研究。

一是人工智能嵌入显著提升关键核心技术创新效率。新一轮科技革命和产业变革加速演进,高技术产成品生产函数的底层架构发生深刻变动(吴涵和郭凯明,2023)^[7],新兴数据要素与人工智能深度嵌入展现出愈发重要的战略价值(陈艳利和蒋琪,2024)^[8]。与此同时,国外研究指出,人工智能嵌入以其渗透性(Bahoo等,2023)^[9]、协同性(Sahoo等,2024)^[10]、创新性(Sadeghi等,2024)^[11]等“技术—经济”特性,通过核心产业扩张、融合产业赋能与关联产业活化,促进创新链布局重构(Nahar,2024)^[12],增强要素整合精度,提升创新集聚程度,构建关键核心技术创新体系。进一步地,尹志锋等(2023)^[13]与程文(2021)^[14]提出,基于数据基础、算力支撑和算法平台,人工智能嵌入促进关键核心技术创新与高性能计算技术融合发展,推动创新组织范式由传统“泰勒制”向数智“云端制”转变,逐步形成耦合联动、协同互补的关键核心技术体系,推进产业数字化和数字产业化。据此,国内学者提出了新兴数字技术驱动产业创新体系转型升级(张杰和付奎,2021)^[15],加快传统要素“叠加集聚”向数据算法“智能联动”转变(杨俊等,2022)^[16],以及提升关键核心技术创新效率的具体路径。

二是人工智能嵌入推动创新链“长度”“广度”和“宽度”的拓展。人工智能嵌入推动生产要素创新配置与产业深度转型升级(刘鑫鑫和韩先锋,2023)^[17],为核心制造业的质量变革、效率变革和动力变革提供内生驱动力,成为创新链关键技术节点“智改数转”的重要引擎与强大驱动器(何宇等,2021)^[18]。随之,通过推动生产工序的数控化与增材制造的智能化,人工智能嵌入显著延长了创新链的“长度”,助力关键技术突破沿着高精尖领域纵深推进(武建龙和王宏起,2014)^[19]。同时,人工智能嵌入推动机器换人、工厂互联与智能制造,系统改造传统创新链(黄浩权等,2024)^[20],使其由线性、树形创新链向网状转变,引领数智模拟、仿真实验、传感技术融入生产环节,打通创新链关键环节堵点卡点,拓展创新链覆盖范围与技术溢出边界,扩大创新链“广度”(贾卫峰等,2024)^[21]。基于此,国内外学者围绕创新链高技术产能价值延伸“长度”和数字化转型规模经济“广度”,对人工智能嵌入推动创新链布局重构机制与路径进行了多维度的诠释,包括不同区域多元化创新主体联动(Khatib,2023)^[22],产创节点合作的发展体系(杨汝岱等,2023)^[23],以及整合关键技术产业垂直一体化发展路径(田秀娟和李睿,2022)^[24]等,诠释产业新旧动能转换体系的结构承载(Liu等,2023)^[25],进一步拓展创新链颠覆性技术场景应用“宽度”。

三是人工智能嵌入推动创新链布局合理化与高级化。贸易保护主义、逆全球化抬头,国内前沿科技领域创新链布局重构动力转换面临“卡脖子”技术掣肘(潘珊和郭凯明,2024)^[26],提升网络协同制造效能、增强离散型智能制造能力、重构创新链新布局成为科技创新和产业发展的趋势(张洪胜等,2024)^[27]。推动创新链布局重构以增强现代化产业体系整体效能上升为国家战略,学术研究逐步由生产链积聚转向创新链布局,突破纯经济效应的考量。学者们从理论上提出人工智能嵌入推动先进工艺、信息技术与生产设备深度融合(陈劲等,2024)^[28],赋能数字孪生、人机交互等新技术创新应用(吕越等,2023)^[29],推进长短并进、前后关联与纵横协同(罗胤晨等,2024)^[30],以及重组、迁移与融通创新链(曲冠楠等,2023)^[31],重塑创新链前瞻引领型、战略导向型与应用支撑型前沿科技优势(陆明和杨德明,2024)^[32],降低前后端错位程度,提升创新链延展精度的观点。吕越等(2024)^[33]通过实证研究人工智能嵌入与产业链“延链补链”的产业高质量发展问题,发现人工智能

嵌入有效推动创新链布局合理化与高级化。Wamba 等(2024)^[34]、Mariani 等(2023)^[35]和 Rammer 等(2022)^[36]得出与上述研究相似的结论。

综上,现有研究存在如下不足:第一,大多数人工智能与创新链问题的相关研究集中于人工智能嵌入与创新链布局的定性讨论,并未构建相关指标对两者之间的数量关系进行测度。第二,学者们大多聚焦传统产业层面,探究数智企业研发对创新链布局重构的推动作用,测度人工智能宏观政策对创新链布局重构的外生冲击,抑或是研究智能生产设备与创新链生产效能两者之间的内在关系,而人工智能嵌入推动创新链布局重构的实证研究较少,对创新链价值延伸的分析更为匮乏。第三,现有研究忽视了人工智能嵌入与传统生产技术存在质的区别,会对创新链布局重构产生颠覆性的渗透赋能作用。因此,借鉴现有研究,基于“卡脖子”技术视角,定量测度人工智能嵌入对创新链布局重构的推动作用,旨在探寻政府“看得见的手”通过靶向目标设计,推动人工智能嵌入中国关键核心技术创新链布局重构,打开人工智能嵌入推动创新链布局重构的机制“黑箱”,探寻有效实践路径。

三、理论分析与研究假说

单边主义、贸易保护主义持续升温的背景下,发达国家利用俘获型全球创新链网络,加速世界创新体系逆全球化“脱钩裂解”,导致中国关键核心技术创新链布局受到冲击,亟需借助人工智能嵌入赋能关键技术的原始创新、靶向协同和价值创造。故而,有必要从中国“卡脖子”技术创新链视角,对人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构问题的内在机制进行分析。

1. 人工智能嵌入推动创新链布局重构的直接效应

人工智能嵌入整合关键数据要素,加快中国前沿创新领域核心技术研发,构建关键核心技术跨界协同、耦合联动、定向溢出的多元化生产体系,推动创新链布局重构。新一代数字技术创新浪潮下,人工智能嵌入加快创新链信息关联,渗透创新链技术节点,推动创新链价值延伸。人工智能嵌入通过网络连接效应、渗透赋能效应和价值创造效应直接推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

(1)网络连接效应。人工智能嵌入通过增强网络连接的信息处理能力,推动创新链信息流动的高效化和精准化,成为促进各环节协同互动的关键动力。基于深度学习、自然语言处理等先进技术,人工智能能够实时、准确地挖掘与分析海量数据,为创新主体提供科学决策支持,优化资源配置效率,赋能创新链信息流动更加迅捷精准。具体而言,人工智能嵌入赋能关键核心领域的颠覆性、变革性、前沿性技术实现“靶向”突破,推动创新链布局从传统的线性分工模式向高效、协同的网络化重构。同时,人工智能嵌入通过精准的数据支持和算法优化提升要素流通效率,推动创新链关键环节的深度协同,降低技术协作中的不确定性,促进核心技术的独立研发与高效转化,推动创新链整体效能的跃升和布局的系统性重构(张杰和范雨婷,2024)^[37]。人工智能嵌入催生新型创新需求与应用场景,引导创新链向更加前沿、高价值的领域延伸与重构,在智能制造、智慧城市、医疗健康等领域,人工智能嵌入开辟新的创新空间,引导创新链向更加智能化、个性化的方向发展,推动数据要素互通共享与关键技术自主可控,实现数智生产网络的关键数据要素“靶向连接”,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(李金城,2024)^[38]。人工智能嵌入与网络连接的结合打破了传统创新主体边界,促进产学研用之间的深度融合与协同创新,人工智能嵌入引领政府、企业、高校及科研机构等多元创新主体形成更加开放、协同的创新生态系统,提升创新知识流动与技术跨转移效能,推动关键核心技术关联产业各环节的无缝对接与高效协同,促进创新资源的优化配置与共享,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(Haefner 等,2023)^[39]。人工智能嵌入促使创新生态系统更加包容地接纳不同的创新主体、创新模式与创新文化,激发创新主体的活力与创造力,克服创新链数智生产网络技术研发的“木桶效应”和要素流通的“挤出效应”,提升高技术产品研发、生产、

流通多模态交互能力,进一步推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

(2)渗透赋能效应。人工智能嵌入的渗透性使其能够跨越不同行业与领域,实现前沿技术创新广泛传播与应用,打破传统技术创新边界,加快颠覆性技术创新深入到科研、生产、管理等各个环节,为创新链提供全方位技术支持,替代部分传统生产技术,催生大量新的技术解决方案和创新点,加快“卡脖子”技术创新链同核心产业技术交互,推动“卡脖子”技术创新链布局重构。人工智能嵌入渗透赋能企业、科研机构、高校等创新主体,使其能够更高效地处理信息、分析数据、制定决策,提升其创新能力和市场竞争力,帮助创新链各主体能够更好地适应市场需求的变化,推动技术创新和产品升级,促进创新链意图感知、自我演化、有机衔接、循环流转,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(江小涓和靳景,2022)^[40]。人工智能嵌入渗透关键领域核心技术创新链的生产、分配、流通、消费等环节,推进创新链各主体之间的协同与合作,使得不同主体之间的信息共享、资源互补和协同创新变得更加便捷和高效,有效降低关键核心技术的创新成本,加速技术创新成果的转化与应用,赋能“卡脖子”技术创新链前端技术嵌入、中端要素流通、后端价值延伸,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(Obreja等,2024)^[41]。人工智能的渗透赋能效应促进创新链与市场需求紧密对接,通过人工智能嵌入的数据分析与预测能力,创新链各个主体能够更准确地把握市场需求的变化趋势,从而有针对性地开展技术创新和产品研发,推进颠覆性技术创新广泛融合渗透数智创新产业,加快数智化运算效率的颠覆性突破,实现创新链核心环节“精细制造”“柔性生产”,进一步推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

(3)价值创造效应。人工智能嵌入打破传统创新链线性发展模式,构建以数据为核心、算法为驱动的新型创新模式,该模式下新兴数据要素成为创新链最重要的资源,而人工智能嵌入则成为挖掘数据价值、推动数据创新的颠覆性技术创新;通过深度学习和机器学习等技术,人工智能嵌入处理和分析海量数据,持续推动工艺革新、装备升级、管理优化和生产过程智能化,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(Liu等,2020)^[42]。人工智能嵌入促进创新链资源优化配置和高效利用,在传统创新链中,资源的配置往往依赖于生产经验和直觉,存在很大的不确定性和浪费,而人工智能通过智能算法和模型,能够实时分析资源的需求和供给状况,实现资源的精准配置和定向嵌入,增强核心零部件智能化生产能力,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(刘斌和潘彤,2020)^[43]。人工智能嵌入增强创新链对市场需求的敏感度和响应速度,通过大数据分析和预测技术,人工智能嵌入能够实时监测市场动态和消费者行为的变化,为创新链“链主”企业提供精准的市场洞察和经济预测,增强关键核心产业集群智能化生产能力,提升制造业供给与市场需求的适配性,推动“卡脖子”技术创新链布局重构。人工智能利用高密度算法对创新链节点的关键信息进行精细加工与智能耦合,引导关键要素空间融合与核心技术跨界协同,降低高端技术产能与终端客户需求之间的错位程度,推动关键核心技术创新链的产能衔接、要素集聚与技术协同,利用智能系统和数字工厂,整合创新链“卡脖子”技术节点的核心数据要素,改善创新链前端生产体系运行,助力关键数智企业与核心技术节点耦合协同,推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

2.人工智能嵌入推动创新链布局重构的间接效应

人工智能嵌入引领前沿技术创新领域“链主”企业产学研用协同耦合,实现关键数据要素与先进制造技术深度融合,以要素空间融合为基础、产业技术协同为导向、生产高端创新为目标,进一步推进创新链各个节点互联互通、创研产销紧密结合,持续推动工艺革新、装备升级、管理优化和生产过程智能化,加速提升供给体系适配性,引领带动产业体系优化升级,实现创新链价值延伸。

(1)创新要素空间融合。传统生产技术虽能够通过数字化平台优化关键要素配置,提升创新链流通和迭代效率,但难以实现关键要素的定向集聚和精准嵌入,导致创新链前后端要素空间融合不足。根据技术进步的内在增长理论,技术创新效率与科技研发投入紧密相关。在大数据时

代,人工智能嵌入融合大数据、云计算、互联网和元宇宙等技术优势,加速创新链各环节对集成数据算法、新兴数据要素和生产技术模块的整合运用,实现关键要素的双循环互联互通,提升整体研发效率,系统赋能“卡脖子”技术创新链布局重构(任英华等,2023)^[44]。同时,人工智能嵌入“卡脖子”技术创新链产品开发子系统中,通过创新平台和服务体系引导关键数据要素定向流入,构建“关键数据—核心技术—创新产能”的产创联动体系,在数智生产空间中集聚关键要素、核心技术和优质产能,拓宽产品开发的创新边界,提升高技术产品的质量和效率,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(李玥等,2023)^[45]。此外,人工智能嵌入推动技术创新模型的耦合集成与训练增强,提升数智生产网络延展性,促进双循环关键数据要素在“卡脖子”技术创新链中的指向性集聚和数智化流通,形成循环畅通的创新生态系统,推动“卡脖子”技术创新链各环节关键要素由静态链式集聚向动态空间融合的转变,引导高精尖技术的空间溢出、产学研要素的精准投放以及新业态科技创新提质增效,统筹科技研发、产品开发和市场化三个子系统之间的关键要素流通,推动前沿创新领域生产模块智能化运转,推进工艺、装备、软件、网络的系统集成和深度融合,加强新兴制造业核心技术攻关,解决创新链关键环节基础性、共性的技术短板,进一步推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

(2)创新产业技术协同。传统产业利用通用技术进行产品工艺创新,初步赋能创新链“链主”企业研发、生产、销售全过程,虽能够在一定程度上改善要素整合与研发创造环节的创新体系,但难以填补“卡脖子”技术创新链薄弱环节关键技术缺陷与科技创新沟壑所导致的创新孤岛现象、创新绩效假象与创新产能脱钩。若要进一步推动“卡脖子”技术创新链布局重构,则需要利用新兴数字技术对传统产业的技术创新体系和技术协同范式进行优化(邸晓燕和张赤东,2018)^[46]。数字经济时代,人工智能嵌入基于数据模型的知识共享和技能赋能,支持高端技术协同和用户交互平台建设,以核心数据要素推动产业链供应链前后端数智企业间的生产协同、资源共享和业务协同,完善前沿科技创新标准体系建设,为创新链关键环节智能制造提供“中国范式”;加快新一代信息技术与制造全过程、全要素深度融合,推进创新产业制造技术突破和工艺创新,实现泛在感知、数据贯通、集成互联、人机协作和分析优化,建设智能场景、智能车间和智能工厂,推动“卡脖子”技术创新链布局重构(陈强远等,2024)^[47]。同时,在新兴数字基础设施的基础上,人工智能嵌入利用高精度加密算法,实现研发知识、生产数据、创新算法与核心算力四大要素深度融合,最大化赋能传统产业关键技术创新;利用智能化创新网络,实现技术研发、产品设计、生产制造、市场推广等环节的紧密衔接,形成快速响应市场需求的闭环创新体系,加快传统产业技术数字化、智能化、数智化升级迭代,破除关键技术协同的“创新孤岛”,提升“卡脖子”技术创新链的创新绩效与创新产能,进一步推动“卡脖子”技术创新链布局重构。

因此,本文提出如下假设:

H₁:人工智能嵌入推动了“卡脖子”技术创新链布局重构。

H₂:人工智能嵌入通过创新要素空间融合推动了“卡脖子”技术创新链布局重构。

H₃:人工智能嵌入通过创新产业技术协同推动了“卡脖子”技术创新链布局重构。

四、研究设计

1. 计量模型

结合上述理论机制分析和研究假设,将创新链布局重构效能作为被解释变量,人工智能嵌入作为核心解释变量,加入相关控制变量,构建基准回归模型,进一步对人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构问题进行实证检验。具体模型如式(1)所示:

$$ERL_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 AIE_{it} + \theta X_{it} + \lambda_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, ERL_{it} 表示 i 行业 t 年的创新链布局重构效能, AIE_{it} 表示 i 行业 t 年的人工智能嵌入程度, X_{it} 表示一系列控制变量的组合, 具体包括经济规模($lngdp$)、进口依存度(imp)、出口依存度(exp)、制度环境($inst$)和基础设施建设(tra), λ_i 表示行业固定效应, ϑ_t 表示年份固定效应, ε_{it} 为模型残差项。同时, 本文构建人工智能嵌入推动创新链布局重构效能的中介效应模型, 如式(2)~式(5)所示:

$$FSIE_{it} = \beta_0 + \beta_1 AIE_{it} + \eta X_{it} + \lambda_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$ERL_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 AIE_{it} + \gamma_2 FSIE_{it} + \varphi X_{it} + \lambda_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$ITSE_{it} = \delta_0 + \delta_1 AIE_{it} + \psi X_{it} + \lambda_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$ERL_{it} = \nu_0 + \nu_1 AIE_{it} + \nu_2 ITSE_{it} + \omega X_{it} + \lambda_i + \vartheta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $FSIE_{it}$ 表示 i 行业 t 年的要素空间融合效率, $ITSE_{it}$ 表示 i 行业 t 年的产业技术协同效率。在此基础上, 对人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构问题进行实证研究。

2. 变量说明

(1)被解释变量: 创新链布局重构效能(ERL)。参照现有研究中有关创新链数智企业生产网络结构的测度方法, 以及35项“卡脖子”技术技术关联产业的技术创新节点数的度量方法, 构建“卡脖子”技术创新链布局重构效能指标。具体而言, 创新链通过数字化转型充分发挥创新螺旋“向心力”, 吸引新创企业围绕创新集群进行布局, 加快数字产业前端的产创活动空间融合, 催生并培育邻近创新集群的新体系、新业态和新模式, 推动科研机构、科创企业与高等院校技术耦合, 提升创新链前端布局重构效能。同时, 创新集群的技术溢出效应促进创新关联产业技术协同, 提升关键技术转化和创新要素利用效率, 赋能新技术、新知识、新产品的双循环互联互通, 形成创新引领、空间溢出、产销协同的“创新中介”, 提升创新链中端布局重构效能。此外, 创新集群利用技术嵌入的隐性知识溢出, 促进关键要素与高技术中间品靶向集聚, 借助创新链前后端产能对接的规模经济, 推动创新产业邻近布局、创新合作, 加快人才培养、科技创新和成果转化深度融合, 提升创新链后端布局重构效能。在此基础上, 新兴数字技术引导新创企业、创新集群、创新产业精准布局, 形成创新链前端、中端与后端布局重构“三位一体”的良性创新生态系统和产业组织形态。据此, 本文构建“卡脖子”技术创新链前端、中端、后端的布局重构效能, 如下所示:

$$ELRI_{front, it} = \frac{Pe}{dv} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k, t=1}^m \Theta_{F, ikt} (Y_{M, ikt} + Y_{I, ikt}) \right] \quad (6)$$

$$ELRI_{inter, it} = \frac{a\theta}{dv} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k, t=1}^m \frac{\Theta_{F, ikt} \Theta_{B, ikt}}{|\Theta_{F, ikt} - \Theta_{B, ikt}|} (Y_{M, ikt} + Y_{I, ikt}) \right] \quad (7)$$

$$ELRI_{back, it} = \frac{Nc}{dv} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k, t=1}^m \Theta_{B, ikt} (Y_{M, ikt} + Y_{I, ikt}) \right] \quad (8)$$

其中, $ELRI_{front, it}$ 、 $ELRI_{inter, it}$ 和 $ELRI_{back, it}$ 分别表示 i 行业创新链前端、中端和后端在 t 年的布局重构效能, k 表示前沿技术研发效率, P 表示生产所使用的智能工业机器人数量, e 表示数据要素密度, a 表示生产要素流通速率, θ 表示跨境智能生产协同指数, N 表示“卡脖子”技术节点数量, c 表示关键技术核心技术溢出效应, d 表示核心技术研发成本, v 表示国际贸易冰川成本, Θ_F 和 Θ_B 分别表示创新链前后端技术交互效能, Y_M 和 Y_I 分别表示要素空间融合效率与产业技术协同效率。据此, 本文构建“卡脖子”技术创新链布局重构效能指标, 具体表达式如式(9)所示:

$$ERL_{it} = \frac{ELRI_{front, it} + ELRI_{inter, it} + ELRI_{back, it}}{3} \quad (9)$$

其中, ERL_{it} 表示 i 行业在 t 年的创新链整体的布局重构效能。据此, 通过对创新链各个环节的研发、生产、流通等经济活动进行刻画, 构建创新链布局重构效能指标, 更为精准地描述中国“卡脖子”技术创新链布局重构水平。

(2)解释变量:人工智能嵌入程度(AIE)。借鉴陈凤仙(2022)^[48]的思路,根据科学技术部《国家创新能力评价指标体系》,选取并测度人工智能产业业务收入、人工智能万人发明专利拥有量、年新增人工智能企业数、人工智能产业领域行业标准数量、人工智能产业投融资交易额、人工智能产业规模占全球比重等 24 个二级指标,并据此合成数智产业发展水平、数字技术创新水平、数智企业发展水平、数智环境发展水平、数字投融资水平、数智国际影响力六个一级指标,指标体系如表 1 所示。

表 1 人工智能嵌入程度的指标体系

一级指标	二级指标	权重	属性
数智产业发展水平	人工智能产业业务收入(万元)	0.062	+
	业务收入年增长率(%)	0.025	+
	人工智能企业总数(个)	0.053	+
	全国人工智能产业园区产值年增长率(%)	0.036	+
数字技术创新水平	人工智能万人发明专利拥有量(个/万人)	0.028	+
	专利申请机构平均申请数量(个)	0.051	+
	PCT 国际专利申请量(个)	0.042	+
	人工智能研发投入占地区生产总值比重(%)	0.035	+
数智企业发展水平	年新增人工智能企业数(个)	0.024	+
	年新增上市人工智能企业数(个)	0.052	+
	平均每家人工智能企业资产(万元)	0.072	+
	平均每家人工智能企业税前损益(万元)	0.021	+
数智发展环境水平	政府支持项目数(个)	0.019	+
	国家级和省部级政策支持文件数(个)	0.025	+
	从业人员平均薪酬(万元)	0.036	+
	人工智能产业领域国家标准数量(个)	0.054	+
数智投融资水平	获得投资的企业数量(个)	0.043	+
	投资强度(万元/公顷)	0.038	+
	人工智能产业投融资交易额(万元)	0.046	+
	人工智能产业投融资交易数量(笔)	0.060	+
数智国际影响力	人工智能产业规模占全球比重(%)	0.024	+
	人工智能领域对外投资额(万元)	0.048	+
	本国主办的人工智能产业各类活动占全球比重(%)	0.061	+
	本国主导和参与建立的人工智能领域国际机构数(个)	0.045	+

(3)中介变量:要素空间融合效率(FSIE)和产业技术协同效率(ITSE)。结合创新链中端的要素空间融合效率,构建创新要素集聚能力的表达式,如式(10)所示:

$$IA_{it} = Y_M \frac{y_{F, it} / \sum_{i=1}^n y_{B, it}}{\sum_{k=1}^n y_{F, ikt} / \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n y_{B, ikt}}$$

(10)

其中, IA_{it} 表示 i 行业在 t 年的创新要素集聚能力, Y_M 表示创新链中介的要素空间融合效率, y_F 和 y_B 分别表示创新链前端关键要素产量和后端高技术产成品。在此基础上,构建要素空间融合效率的表达式,如式(11)所示:

$$FSIE_{it} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n |IA_{front,ikt} - IA_{back,ikt}|}{2n^2 IA_{inter,ikt}} \quad (11)$$

其中, $FSIE_{it}$ 表示 i 行业创新链整体在 t 年的要素空间融合效率, $IA_{front, it}$ 、 $IA_{inter, it}$ 和 $IA_{back, it}$ 分别表示 i 行业创新链前端、中端与后端在 t 年的要素空间融合效率。

进一步地, 构建创新链产业技术协同效率指标, 具体表达式如式 (12) 所示:

$$NSC_{it} = Y_i \frac{c(y_{F, it} + y_{B, it})}{dv} \quad (12)$$

其中, NSC_{it} 表示 i 行业创新链整体在 t 年的生产阶段数, 其值越大, 表明创新链该环节生产一单位高技术产品需要其他环节更多的关键要素投入与核心技术协同, Y_i 表示创新链中介的产业技术协同效率, c 表示创新产业技术协同系数, $y_{F, it}$ 和 $y_{B, it}$ 分别表示创新链前端关键要素产量和后端高技术产成品, dv 表示跨境技术交互成本。在此基础上, 构建创新链产业技术协同效率的表达式, 如式 (13) 所示:

$$ITSE_{it} = 1 + a(e - \nu)NSC_{front, it}NSC_{inter, it}NSC_{back, it} \quad (13)$$

其中, a 表示关键要素投入数量, e 表示关键要素产出弹性系数, ν 表示关键要素流失系数, $NSC_{front, it}$ 、 $NSC_{inter, it}$ 和 $NSC_{back, it}$ 分别表示 i 行业创新链前端、中端和后端在 t 年的生产阶段数。

进一步地, 采用研究设计部分中要素空间融合效率 ($FSIE$) 的指标构建方法, 将产业技术协同效率 ($ITSE$) 指标细分为前向产业技术协同效率和后向产业技术协同效率, 深入探究人工智能嵌入通过创新产业技术协同推动“卡脖子”技术创新链布局重构的中介效应, 具体测度方法如式 (14)、式 (15) 所示:

$$ITSE_{xt(y)} = c \frac{\sum_{x=1}^R ITSE_{xy, it}}{\sum_{x=1}^R \sum_{y=1}^R ITSE_{xy, it}} \quad (14)$$

$$ITSE_{yt(x)} = c \frac{\sum_{y=1}^n ITSE_{xy, it}}{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n ITSE_{xy, it}} \quad (15)$$

其中, $ITSE_{xy, it}$ 为技术协同矩阵的 x 行 y 列的元素, c 表示创新产业技术协同系数, $ITSE_{xt(y)}$ 和 $ITSE_{yt(x)}$ 分别表示创新链前、后向产业技术协同效率, 前向产业技术协同效率代表创新链前端关联产业原始创新节点的技术协同对其他各环节技术创新效率的提升作用, 其值越大, 表明该原始创新节点对其他各环节技术创新的促进作用越大。后向产业技术协同效率代表创新链后端关联产业产能输出节点的技术协同对其他各环节高技术产品流转效率的提升作用, 其值越大, 表明该产能输出节点对其他各环节高技术产品流转的推动作用越强。

(4) 控制变量。基于现有研究, 选取以下控制变量: ①经济规模 ($lngdp$), 采用行业生产总值的对数进行衡量; ②进口依存度 (imp), 采用行业商品和服务进口额与 GDP 的比值进行衡量; ③出口依存度 (exp), 采用行业商品和服务出口额与 GDP 的比值进行衡量; ④制度环境 ($inst$), 采用行业经济自由度指数进行衡量; ⑤基础设施建设 (tra), 采用行业物流绩效指数进行衡量。

3. 数据来源

结合《中国科技统计年鉴》和《中国投入产出表》, 本文利用中经网和锐思数据库, 匹配得到 2013—2023 年 35 个行业的面板数据。其中, 被解释变量创新链布局重构效能计算涉及的原始数据来源于《高新技术产业 (制造业) 分类 (2017)》《中国投入产出表》《全国科技经费投入统计公报》和各省份《统计年鉴》, 缺失数据采用函数插值法补全。同时, 核心解释变量人工智能嵌入程度计算涉及的原始数据来源于人工智能企业数据库和中国海关数据库, 中介变量要素空间融合效率和产业技术协同效率计算涉及的原始数据来源于《中国数字经济发展研究报告》、中国研究数据服务平

台(CNRDS)和《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》。此外,控制变量原始数据来源于历年各省份《投入产出表》。同时,对上述变量进行描述性统计,如表 2 所示。

表 2
 变量描述性统计

变量类型	变量名称	变量符号	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	创新链布局重构效能	<i>ERL</i>	23485	4.037	0.695	2.355	6.920
解释变量	人工智能嵌入程度	<i>AIE</i>	23485	0.030	0.044	0	0.663
中介变量	要素空间融合效率	<i>FSIE</i>	23485	0.993	1.600	0	21.674
	产业技术协同效率	<i>ITSE</i>	22608	50.025	17.288	16.981	92.427
控制变量	经济规模	<i>lngdp</i>	23485	26.446	1.652	22.886	30.657
	进口依存度	<i>imp</i>	23485	46.399	27.104	11.255	163.712
	出口依存度	<i>exp</i>	23485	48.937	30.929	10.706	196.420
	制度环境	<i>inst</i>	23485	62.353	11.600	1	84.200
	基础设施建设	<i>tra</i>	23485	0.309	0.076	0.237	1.681

本文基于 2013—2023 年中国 35 个行业的面板数据,通过构建多维指标体系对研究变量进行测度。由表 2 描述性统计可知,创新链布局重构效能(*ERL*)均值为 4.037(标准差 0.695),反映出样本期内中国“卡脖子”技术创新链整体处于中等重构水平,但行业间存在显著分化特征。人工智能嵌入程度(*AIE*)均值为 0.030(标准差 0.044),显示行业智能化渗透尚处初级阶段且离散程度较高,为验证技术嵌入的异质性效应提供了数据基础。要素空间融合效率(*FSIE*)与产业技术协同效率(*ITSE*)均值分别为 0.993 和 50.025,标准差达 1.600 和 17.288,表明关键要素优化配置与跨产业技术衔接在行业层面呈现非均衡态势,与理论分析中创新链布局重构的梯度传导机制形成印证。从控制变量看,进口依存度(*imp*)与出口依存度(*exp*)标准差达 27.104 和 30.929,揭示样本行业在嵌入全球价值链方面存在显著差异,这为检验人工智能嵌入对创新链布局重构的推动作用提供现实依据。

五、实证分析

1. 基准回归与分析

基于上述基准回归模型,本文分别采用混合回归、固定效应回归、LSDV 法和 FGLS 法,对人工智能嵌入驱动“卡脖子”技术创新链布局重构问题进行实证检验,回归结果如表 3 所示。

表 3
 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
<i>AIE</i>	1.007*** (0.130)	1.174*** (0.139)	1.209*** (0.141)	0.988*** (0.129)	1.052*** (0.195)	0.977*** (0.193)	0.997*** (0.121)	1.004*** (0.173)
控制变量	不控制	控制	控制	控制	不控制	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	23485	23485	23485	23485	23485	23485	23485	23485
调整 R ²	0.715	0.609	0.611	0.717	0.674	0.529	0.589	0.684

注:*, **, ***分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平;括号内为稳健标准误,下同

表 3 第(1)~(4)列的混合回归法结果显示,人工智能嵌入的回归系数均显著为正,且显著性水平达到 1%,表明人工智能嵌入程度越高,其通过资源优化配置、技术赋能和数据整合等机制推动

“卡脖子”技术创新链布局重构的作用越强。第(5)~(6)列的固定效应回归进一步剔除了时间不变的个体效应干扰,结果依然显著支持人工智能嵌入的正向推动作用,验证了人工智能嵌入对创新链布局重构影响的内生性较弱。同时,第(7)列的LSDV法和第(8)列的FGLS法结果进一步通过异方差调整和个体差异控制强化了结论的稳健性。整体来看,不同回归模型的调整R²均维持在较高水平(最高达0.717),表明模型良好的解释力。结果揭示了人工智能嵌入通过提升创新要素利用效率、加速技术协同和优化创新链结构,显著推动“卡脖子”技术创新链布局重构的效能,尤其是在技术复杂度高、协同性要求强的领域表现尤为突出。综上,假设H₁得到验证。

2. 内生性检验

根据上述结论,人工智能嵌入有效地推动了“卡脖子”技术创新链布局重构,但关键领域“卡脖子”技术创新链布局重构带来的技术创新范式颠覆性突破会提升人工智能嵌入程度,诱发反向因果问题。同时,对主要变量的测度存在误差,引致内生性问题。据此,本文通过工具变量法和组内差分法缓解计量模型的内生性问题。

基于孙早和侯玉琳(2021)^[49],以及杨仁发和郑媛媛(2023)^[50]的研究,本文构建四种工具变量对模型的内生性问题进行处理。第一,构建人工智能嵌入程度的滞后一期(IV1)作为工具变量。人工智能嵌入具有渐进式发展的特性,滞后一期的人工智能嵌入会对当期产生较大影响。同时,人工智能技术具有快速迭代、精准对接、靶向交互的特点,对创新链要素空间融合与产业技术协同具有时效性,滞后一期的人工智能嵌入程度很难对当期的创新链布局重构效能产生影响,因此工具变量满足相关性与外生性条件。第二,构建人工智能领域的论文产出数据(IV2)作为工具变量。人工智能领域的论文创作属于理论技术创新,会对应用技术创新的人工智能嵌入产生促进作用。同时,理论技术创新向应用技术创新转化需要较大的要素成本,难以对创新链布局重构产生提质增效的即时影响,满足工具变量的相关性 with 外生性条件。三是构建1984年各数智企业创新集群邮局数与互联网宽带端口数的交乘项(IV3),以及固定电话数与光缆密度的交乘项(IV4)作为工具变量。一方面,人工智能嵌入是与电子计算机相辅相成的新兴数字技术,而计算机的发展与电话、邮局、光缆等信息基础设施的运作密切相关,因此,邮局、电话、光缆、互联网宽带端口数量的增加会基于信息技术设施层面进行信息要素转换,加快数据要素耦合联动,推动人工智能嵌入快速发展。另一方面,创新链布局重构的技术协同、产销联动与关键节点耦合大多已实现数字化“跨界联通”,在很大程度上克服了传统信息媒介在地域、时段、成本等方面的局限性,因此,邮局、电话、互联网宽带端口数量很难对创新链布局重构产生影响。

表 4 内生性检验

变量	工具变量法				组内差分法
	(1)IV1	(2)IV2	(3)IV3	(4)IV4	(5)
<i>AIE</i>	0.659*** (0.178)	1.030*** (0.151)	0.988*** (0.131)	0.881*** (0.130)	0.948*** (0.121)
Kleibergen-PaaprLM 值	308.42***	233.82***	363.60***	358.51***	—
Kleibergen-PaaprWald 值	897.74***	1732.00***	31531.13***	58248.34***	—
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是	是	是
观测值	23485	23485	23485	23485	21350
调整 R ²	0.717	0.717	0.719	0.717	0.040

通过上述内生性检验,工具变量的 Kleibergen-Paaprk LM 值和 Wald 值均显著,表明所选工具变量具有较强的解释能力和统计显著性。回归结果显示,人工智能嵌入的影响系数在 1% 的显著性水平上依然为正,验证了人工智能嵌入对创新链布局重构的正向推动作用。此外,组内差分法(第(5)列)进一步剔除了时间不变的个体效应,依然得到显著正向系数,支持基准回归结论的稳健性。这表明,人工智能嵌入对创新链布局重构的影响并非由内生性偏误驱动,而是具有显著的因果效应。综合来看,人工智能嵌入通过数智赋能、技术协同与要素优化等机制显著提升了“卡脖子”技术创新链的布局重构效率,实证结果具有较高的可靠性与稳健性,为政策设计提供了坚实的理论与实证依据,验证了假设 H_1 。

3. 稳健性检验

为进一步验证核心结论的稳健性,本文采用更改解释变量的测度方法、替换被解释变量、改变统计口径、剔除异常值和 PSM,对基准回归结果进行稳健性检验,回归结果如表 5 所示。

表 5 稳健性检验

变量	更改解释变量的 测度方法	替换被解释变量			改变统计口径	剔除异常值	PSM
		$ELRI_{front}$	$ELRI_{inter}$	$ELRI_{back}$			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
AIE	0.095*** (0.015)	1.038*** (0.125)	0.291*** (0.030)	0.703*** (0.016)	1.223*** (0.132)	0.913*** (0.125)	0.394*** (0.000)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
行业/年份 固定效应	是	是	是	是	是	是	是
观测值	23485	23485	23485	23485	22895	17285	18396
调整 R^2	0.717	0.665	0.678	0.548	0.572	0.682	0.607

本文从多维度展开稳健性分析,以验证核心结论的可靠性。第一,更改解释变量的测度方法。通过从人工智能嵌入的数智创新资源、数智知识创造、数智企业创新、数智创新绩效、数智创新环境五个维度重新构建指标体系,实证结果显示,无论指标如何调整,人工智能嵌入对创新链布局重构的促进效应始终显著为正,表 5 第(1)列表明其结论具有较强的稳健性。第二,替换被解释变量。进一步采用创新链前端布局重构效能($ELRI_{front}$)、中介布局重构效能($ELRI_{inter}$)以及后端布局重构效能($ELRI_{back}$)三个分项指标替代整体布局重构效能,表 5 的第(2)~(4)列结果表明,人工智能嵌入对创新链布局重构的分项效能均具有显著推动作用,且在前端布局的效能提升作用最为强劲,强化了结论的层次性和普适性。第三,改变统计口径。选取 2022 年及之前的政策实施前数据进行检验,表 5 的第(5)列表明,回归结果依然稳定显著,进一步从时间维度验证了结论的稳健性。第四,剔除异常值。采用剔除样本残差大于 5 的异常值处理方法,表 5 的第(6)列显示,人工智能嵌入的核心系数未发生显著变化,表明结论未受到极端样本的影响。第五,采用倾向得分匹配法(PSM)。通过匹配具有相似特征的样本对人工智能嵌入效应进行再估计,表 5 的第(7)列显示,回归系数依然显著且方向一致,进一步增强了推论的因果效应解释力。综上,稳健性检验从多角度验证了人工智能嵌入通过优化资源配置、提升技术协同效率和推动要素空间融合,在“卡脖子”技术背景下显著促进了创新链布局重构的核心结论,具有高度的可靠性和稳健性,为研究结果提供了坚实的实证支撑。

4. 机制检验

基于上述中介效应模型,进一步检验人工智能嵌入通过创新要素空间融合与创新产业技术协同推动“卡脖子”技术创新链布局重构,中介效应回归结果如表 6 所示。

表 6 中介效应检验

变量	创新要素空间融合	创新产业技术协同	
	(1)	(2)	(3)
<i>AIE</i>	1.701*** (0.127)	1.767*** (0.074)	0.964*** (0.188)
控制变量	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是
观测值	22608	23485	23485
调整 R ²	0.512	0.704	0.501

表 6 第(1)列结果显示,人工智能嵌入对要素空间融合效率影响的估计系数为 1.701,且在 1% 水平上显著为正,表明人工智能嵌入通过创新要素空间融合有效推动了“卡脖子”技术创新链布局重构,假设 H₂得以验证。同时,表 6 第(2)和(3)列中人工智能嵌入对创新链前、后向产业技术协同效率影响的估计系数分别为 1.767 和 0.964,且在 1% 水平上显著为正,表明人工智能嵌入通过创新产业技术协同推动“卡脖子”技术创新链布局重构,假设 H₃得以验证。据此,本文认为,人工智能嵌入以迭代创新优势优化关键要素配置,提升创新链模型管理、数据处理与算力整合能力,通过强化“关键要素—核心技术—创新产能”产创联动体系,推动数据要素集聚、核心算法优化及要素空间融合,从链式输送向空间精细化转变,加速创新链各环节的协同与重构。同时,人工智能嵌入赋能创新链原始创新节点,通过深度学习、跨界融合和人机协同等机制,提升核心生产技术的智能化升级效率,并通过高效分析与靶向输送创新链数据资源,优化前后向产业技术协同,促进关键技术节点的互联互通和产能投放精准化,构建创新驱动的技术协同生态,加快新技术、新产品、新业态的布局重构,为创新链价值延伸注入新动能。

5. 异质性检验

(1)产业异质性。人工智能嵌入重塑“卡脖子”技术创新链关联产业的分工格局,依据集聚要素的种类,通过智能识别、技术嵌入和靶向渗透,对不同产业产生异质性作用。据此,本文将“卡脖子”技术创新链关联产业分为劳动密集型、资本密集型和技术密集型,探究人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构的产业异质性。具体而言,借鉴张杰和付奎(2021)^[51]以及程文(2021)^[52]的研究,通过投入产出表中行业资本、劳动和技术要素的贡献比例进行科学划分,同时结合《中国高技术产业分类标准(2017)》和“卡脖子”技术清单的行业分布数据进行校验,以确保划分的准确性与理论契合性。劳动密集型产业被界定为单位产出中劳动投入占比高于资本和技术投入的行业,主要包括纺织服装、传统制造等依赖低技能劳动力的大众化行业;资本密集型产业则以资本要素为主导,通常体现为较高的固定资产投入依赖,涵盖能源、化工、装备制造等行业;技术密集型产业则对应“卡脖子”技术高频分布的领域,具有较高的研发强度和技术壁垒,典型代表为集成电路、航空航天和生物医药等高技术产业。通过对 2013—2023 年 35 个行业面板数据进行因子分析和聚类检验,本文提取劳动、资本和技术要素的主成分得分,结合行业特征进行分类验证。回归结果如表 7 所示。

表 7 产业异质性回归结果

变量	总体样本(行业)	劳动密集型	资本密集型	技术密集型
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>AIE</i>	0.287* (0.156)	-2.794** (1.163)	2.151** (1.069)	0.637*** (0.148)
控制变量	控制	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是	是
观测值	10736	2684	4697	3355
调整 R ²	0.585	0.663	0.538	0.630
组间似无相关检验(suest)	-	0.000	0.000	0.000

表 7 列示了人工智能嵌入对不同类型产业在“卡脖子”技术创新链布局重构中的异质性作用,体现出显著的产业分化特征。具体而言,人工智能嵌入对资本密集型产业的推动效应最为显著,其回归系数为 2.151,并在 5% 的显著性水平上显著为正,表明资本密集型产业因较高的技术吸纳能力和资本配置效率,能够充分承接人工智能嵌入的技术赋能效应,进而加速关键要素配置优化与技术协同深化,实现创新链布局的高效重构。技术密集型产业的人工智能嵌入回归系数为 0.637,显著性水平达到 1%,显示出人工智能嵌入在提升研发效率、强化技术突破和推动创新链整合方面的积极作用。然而,相较于资本密集型产业,其效应强度有所减弱,这可能源于技术密集型产业在前沿技术研发过程中面临较高的不确定性与资源消耗,限制了人工智能嵌入的短期效能释放。相反,劳动密集型产业的人工智能嵌入对创新链布局重构的影响则呈现出显著的负向效应,其回归系数为-2.794,并在 5% 的显著性水平上显著为负,这表明劳动密集型产业因技术基础薄弱、生产要素依赖传统路径,难以匹配人工智能嵌入所需的技术协同与要素升级要求,甚至可能因技术嵌入造成就业结构性冲击和要素错配,从而抑制创新链布局的优化提升。上述结果反映出,人工智能嵌入对产业的技术协同效应与要素重组效应存在显著的异质性,其效应强度与方向在很大程度上依赖于产业的技术密集程度与资本禀赋水平。

(2)创新链位置异质性。依据创新链理论的系统分工框架(Teece, 1986^[53]; Nelson 和 Winter, 1982^[54])及其在高新技术产业中的应用(Dosi, 1988^[55]; Rammer 等, 2022^[56])。本文将创新链分为前端、中端与后端三个部分,考察人工智能嵌入对“卡脖子”技术创新链不同位置布局重构的影响。具体而言,创新链前端主要指核心技术研发与原始创新活动的集中区域,体现为知识溢出与关键技术突破的驱动能力;中端部分则涵盖技术转化、要素流通与产业协同的中间环节,是连接技术研发与市场应用的桥梁;后端包括高技术产成品的生产、流通与市场化扩展环节,反映创新链的产业化与价值实现能力。基于《中国投入产出表》与“卡脖子”技术清单的行业分布数据,结合投入产出表中行业技术关联强度、要素投入结构及价值链延伸方向,本文采用因子分析法提取创新链不同环节的主要特征变量,并通过聚类分析法进行分组验证,确保划分的科学性与适配性。回归结果如表 8 所示。

表 8 创新链位置异质性回归结果

变量	创新链前端	创新链中端	创新链后端
	(1)	(2)	(3)
<i>AIE</i>	1.410*** (0.127)	0.146*** (0.027)	1.018*** (0.122)
控制变量	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是
观测值	3355	5368	8723
调整 R ²	0.655	0.672	0.680
组间似无相关检验(suest)	0.000	0.000	0.000

表 8 的实证结果表明,人工智能嵌入对创新链不同位置的布局重构效应存在显著异质性,且影响强度呈现由前端向后端递减的规律。具体而言,人工智能嵌入对创新链前端布局重构的推动作用最为显著,其回归系数为 1.410,并在 1% 的显著性水平上显著为正,反映出人工智能在创新链前端关键要素集聚与核心技术研发中的深度嵌入效应。人工智能通过优化数据要素配置、提升算法效率以及赋能研发流程,显著增强了前端高技术生产要素的精准投放和技术集聚能力,进而加速了前端布局的数字化、智能化转型。而在创新链中端,人工智能嵌入的影响显著性系数为 0.146,尽管仍通过了 1% 的显著性检验,但其效应强度显著弱于前端。这表明,创新链中端的布局重构主要受制于跨环节要素流通成本与技术协同效率的限制,人工智能嵌入虽能部分缓解信息不对称与资

源错配问题,但对于提升中端环节协同效能的广度与深度尚显不足。对于创新链后端,人工智能嵌入的回归系数为 1.018,显著性水平同样达到 1%。这一结果表明,人工智能通过赋能关键技术产能的靶向集聚与高端产品供给的效率提升,增强了后端布局的柔性生产与价值延展能力。综合来看,人工智能嵌入对创新链布局重构表现出明显的“前端主导”特征,其在前端的研发赋能效应最为突出,而中介环节的效应瓶颈则表明,未来亟需强化人工智能技术在创新链中介要素整合与跨环节协同中的渗透深度,以全面提升创新链布局重构效能。

(3)地区与行业异质性。本文按照要素市场发达指数将样本划分为要素市场发达地区和非要素市场发达地区,探究人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链布局重构的地区异质性。具体而言,参考《中国市场化指数报告》,该指数从市场中介组织发展、要素市场化程度、政府与市场关系等维度全面衡量区域市场化水平,其中要素市场化程度指数重点反映资本、土地、劳动力、技术等要素在区域间的流动性与配置效率。本研究结合其要素市场化子指数,选取测度资本市场化、劳动力市场化和技术交易市场化的具体指标。同时,为增强分析的精确性,依据区域经济发展质量指数,综合考虑地区经济开放度、基础设施水平、创新能力等补充指标,进一步对地区要素市场发达程度进行修正与分组。具体划分中,本文采用分位数法,将要素市场化指数排名前 30% 的地区定义为要素市场发达地区,其余为非要素市场发达地区。回归结果如表 9 所示。

表 9 地区与行业异质性回归结果

变量名称	要素市场发达地区	非要素市场发达地区	高技术行业	低技术行业
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>AIE</i>	2.049*** (0.141)	0.389*** (0.005)	0.623*** (0.143)	0.168*** (0.046)
控制变量	控制	控制	控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是	是
观测值	23485	23485	11506	11597
调整 R ²	0.719	0.717	0.818	0.810
组间似无相关检验 (suest)	0.000		0.000	

表 9 的回归结果揭示了人工智能嵌入对“卡脖子”技术创新链布局重构的地区与行业异质性效应。具体而言,回归结果表明,在要素市场发达地区,人工智能嵌入对创新链布局重构的推动作用显著强于非要素市场发达地区,其回归系数分别为 2.049 和 0.389,且均在 1% 的显著性水平上显著为正。这表明,要素市场发达地区凭借完善的数字基础设施、较高的技术溢出效率及更优的市场化程度,能够有效承接人工智能嵌入所带来的数据要素优化配置与技术协同效应,从而显著提升创新链的布局重构效能。而非要素市场发达地区由于面临技术供给不足、要素流通受限及市场壁垒较高等制约,人工智能嵌入的赋能效果受到较大限制,难以充分释放其在技术创新与产业协同中的潜力。此外,从行业异质性看,高技术行业的人工智能嵌入对创新链布局重构的推动作用显著高于低技术行业,回归系数分别为 0.623 和 0.168,且均通过了 1% 的显著性检验。高技术行业由于具备较高的研发强度和技术吸纳能力,可通过人工智能嵌入引导创新链前中后环节的深度耦合与精准协同,进而实现关键技术突破与产业链优化。而低技术行业由于创新能力不足、技术基础薄弱,人工智能嵌入更多表现为对传统生产方式的补充,难以形成对创新链布局的系统性重塑。整体来看,地区间的要素市场发达程度和行业技术属性显著影响了人工智能嵌入对创新链布局重构的效应强度,表明人工智能嵌入的有效性依赖于高水平的市场化环境与技术密集型行业的深度结合,为推动“卡脖子”技术创新链布局重构指明了差异化的政策路径与实践方向。

六、拓展分析

当前,全球技术颠覆式创新与传统产业数字化变革深刻重塑创新链价值分工体系,中国关键核心技术创新链面临“低端锁定”与“堵链断链”风险加剧的双重挑战。在大数据时代,人工智能嵌入通过高阶算法和智能化生产模式,替代低效能生产力,降低研发试错成本,优化技术要素流通过径,并通过数据分析、算法合成和场景模拟,实现价值创造与技术创新的同步推进,助力传统产业数字化转型与新兴产业智能化发展。人工智能嵌入推动创新链组织架构向柔性化、智能化方向演进,提升关键技术创新效率与价值延展能力。然而,西方国家通过单边脱钩、技术封锁等手段,试图遏制中国高端技术创新,加之地缘冲突与疫情冲击等外部不确定性,进一步加剧关键技术“卡脖子”技术环节的创新链脆弱性。面对这一困境,人工智能嵌入为破解技术掣肘提供了新路径:通过整合高技术创新资源、强化智能生产能力、优化关键节点协同,推动创新链纵向贯通与横向协作,打造数据互联互通、资源柔性配置的创新生态系统,实现传统产业价值链升级与新兴产业技术突破的双重驱动。人工智能嵌入还通过智能化设计与精益生产,加速关键技术领域的深度融合,突破高端产业外溢受限与低端技术回流的困局,为构建自主可控、协同高效的创新链体系提供了核心支撑。据此,本文构建创新链价值延伸长度和宽度指标。

第一,创新链价值延伸长度(LCV)。本文参考Shan等(2023)^[57]的方法,构建创新链价值转换效率指标,具体表达式如式(16)和式(17)所示:

$$VCE_{it} = \frac{\Lambda \theta}{dv} \left| \frac{\Theta_{F,it} + \Theta_{B,it}}{\Theta_{F,it} - \Theta_{B,it}} \right| (Y_{M,it} + Y_{I,it}) \tag{16}$$

$$LCV_{it} = \left[\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T \left(VCE_{iT} - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T VCE_{it} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{17}$$

其中, VCE_{it} 表示*i*行业创新链在*t*年的价值转换效率, LCV_{it} 表示*i*行业创新链在*t*年的价值延伸长度, Λ 表示创新链价值延伸效能, T 表示观测基期。

第二,创新链价值延伸宽度(WCV)。本文参考Omoush等(2023)^[58]的研究,构建创新链价值延伸宽度指标,具体表达式如式(18)所示:

$$WCV_{it} = \Lambda c \left[\left(y_{F,it} \right)^p + \left(y_{B,it} \right)^p \right] \tag{18}$$

其中, WCV_{it} 表示*i*行业创新链在*t*年的价值延伸宽度。人工智能嵌入提升创新链智能机器设备生产率,联动创新链前后端关键技术企业,拓展创新链“链主”企业数智生产网络的生产边界,赋能创新链前端关键要素和后端高技术产成品的技术研发、生产制造与定向流转,提升创新链价值延伸宽度。据此,本文对人工智能嵌入推动“卡脖子”技术创新链价值延伸进行实证检验,回归结果如表10所示。

表 10 人工智能嵌入对“卡脖子”技术创新链价值延伸的影响检验

变量	创新链价值延伸长度		创新链价值延伸宽度	
	未加入控制变量	加入控制变量	未加入控制变量	加入控制变量
	(1)	(2)	(3)	(4)
AIE	0.868*** (0.142)	0.873*** (0.141)	0.052*** (0.015)	0.051*** (0.015)
控制变量	不控制	控制	不控制	控制
行业/年份固定效应	是	是	是	是
观测值	21329	21329	21350	21350
调整 R^2	0.546	0.548	0.334	0.336

表10的实证结果表明,人工智能嵌入对“卡脖子”技术创新链价值延伸的长度和宽度均具有显著的促进作用,但作用强度和传导机制之间存在差异。具体而言,人工智能嵌入通过优化创新链中的关键技术协同与核心要素流通,显著提升了价值延伸的长度,其回归系数在1%的显著性水平上为正,表明人工智能能够有效突破创新链各环节间的阻滞效应,推动关键技术从前端研发向后端市场快速转化,实现价值链的纵向延伸。这一结果反映了人工智能嵌入在提升创新链效率和优化资源配置中的核心作用,尤其是在突破高端技术“堵点”、强化关键环节的技术衔接方面表现尤为突出。同时,人工智能嵌入对创新链价值延伸宽度的影响虽同样显著,但其系数(0.051)相较于长度明显偏低,表明人工智能在扩大创新链覆盖范围、拓展技术外溢边界方面受到一定约束。这种约束可能源于人工智能嵌入在技术扩散过程中面临的规模不经济与边际递减问题,尤其在低端创新链条中,因关键技术吸收能力不足和要素匹配效率较低,导致价值延伸的横向拓展效果受限。整体来看,人工智能嵌入的价值创造效应主要体现在通过提升技术转化效率和要素集聚能力,推动创新链纵向深化,实现从研发到生产再到市场的高效协同。然而,从横向维度看,人工智能嵌入对跨产业、跨领域的协同效应尚未充分释放,创新链的价值延伸呈现“长度优先、宽度滞后”的特征。未来政策设计应更加注重人工智能嵌入在横向协同中的技术扩散能力,通过强化低端环节的技术承接力和要素整合度,推动创新链从纵向渗透向纵横协同转变,全面提升“卡脖子”技术创新链的价值延展效能。

七、研究结论与政策启示

1. 研究结论

本文基于“卡脖子”技术视角,系统探讨人工智能嵌入对创新链布局重构的作用机制及其价值延伸效应,研究结论主要有:一是人工智能嵌入通过优化资源配置、提升技术协同效率和推动要素空间融合,显著促进“卡脖子”技术创新链布局的系统性重构,尤其在创新链的前端环节表现出生产要素集聚效应和技术突破效能。二是不同行业的技术属性和资本禀赋对人工智能嵌入的响应存在显著异质性,资本密集型和技术密集型产业因其较高的技术吸纳能力和协同潜力,呈现较为显著的人工智能渗透赋能效应,而劳动密集型产业则因技术基础薄弱和要素错配,呈现出抑制性影响。三是人工智能嵌入显著推动创新链价值延伸的纵向深化,提升从核心技术研发到高端产成品输出的价值转化效率,但在横向扩展中仍受制于技术溢出的边际递减和跨领域协同的约束。四是区域要素市场发展水平与行业技术密集度显著影响人工智能嵌入的效用强度,发达地区和高技术行业表现出更强的创新链重构能力与价值延展潜力。综上,人工智能嵌入已成为破解“卡脖子”技术瓶颈、推动创新链自主可控和价值跃升的关键抓手,为实现高质量技术创新和国家创新体系效能提升提供了全新路径与实践依据。

2. 政策启示

第一,强化人工智能嵌入的原始技术创新能力,夯实创新链自主可控的技术基础。要瞄准“卡脖子”技术领域的核心技术和关键环节,集中力量突破高端芯片、先进材料、工业软件等领域的技术壁垒,建立以人工智能为核心驱动力的自主创新体系。建议设立国家级人工智能技术研发专项,重点支持具备前沿技术研发能力的龙头企业、高校及科研机构,构建产学研联合攻关机制,推动人工智能技术从实验室到产业化的高效转化。加大人工智能领域研发投入力度,优化资金分配结构,优先支持具备高技术溢出效应的基础研究和核心技术攻关。同时,完善国家科技激励制度,吸引高水平人才投身人工智能嵌入技术创新,推进技术研发与产业转化的高效联动,为“卡脖子”技术创新链布局重构提供强劲技术支撑。

第二,推动人工智能嵌入与创新链的深度融合,加速实现关键领域的产业协同创新。人工

智能嵌入在资本密集型和技术密集型产业中表现出显著的重构效能,因此,应以这些领域为核心,构建人工智能与创新链深度融合的协作机制。建议推动人工智能技术在高端制造业、航空航天、生物医药等领域的精准嵌入,加快智能制造、智能物流和智能服务的系统升级。鼓励人工智能企业与传统制造企业开展联合研发和技术合作,推动人工智能技术在创新链前后端的全面渗透,提升整体协同效能。同时,完善技术协作平台建设,设立区域性或行业性人工智能技术协同中心,优化创新链前后端之间的技术对接与资源共享。通过人工智能技术赋能传统创新链,打破技术协同瓶颈,构建高效、柔性、智能的创新链布局,提升“卡脖子”技术领域的产业协同效能。

第三,加强人工智能嵌入的区域协调发展,构建高效联动的创新链空间结构。研究表明,要素市场发达程度显著影响人工智能嵌入效能,因此,应推动以人工智能嵌入为抓手的区域创新链布局优化。建议通过政策引导和资源倾斜,进一步推动人工智能技术在要素市场发达地区的深度应用,巩固其创新链布局优势。同时,针对要素市场相对欠发达地区,应加强基础设施建设和技术引导,鼓励发达地区向这些区域输出人工智能技术及其应用经验,推动跨区域技术协同与要素流通。构建以人工智能为核心的区域创新共同体,推动区域间技术链与创新链深度融合,形成区域协调发展的创新链网络。此外,应结合区域经济发展实际,制定定向激励政策,吸引高端资源向中西部和欠发达地区集聚,逐步缩小人工智能嵌入效能的区域差距,实现创新链布局的全国性优化。

第四,聚焦人工智能嵌入的多层次价值延展,推动创新链长度和宽度的协同提升。针对人工智能嵌入对创新链价值延伸“长度优先、宽度滞后”的特征,应实施差异化策略,提升多层次价值延展能力。在纵向上,人工智能嵌入需进一步深挖技术研发与市场转化的衔接潜力,优化从核心技术研发到高端产品输出的路径,构建高效的技术转化机制。在横向上,应加快人工智能嵌入成果在更多产业领域的推广应用,提升创新链的覆盖范围与技术溢出效应。建议构建跨领域的人工智能技术扩散平台,促进不同产业间的技术协作与创新融合,逐步突破人工智能嵌入技术扩散中的边际递减效应。同时,完善人工智能技术应用的市场化机制,通过税收减免、融资支持等手段,鼓励企业在不同产业领域应用人工智能技术,推动创新链从单一技术突破向多维度创新跃升。

第五,完善人工智能嵌入的制度保障与治理体系,为创新链布局重构提供制度支撑。结合人工智能技术的快速发展和潜在风险,应构建覆盖创新链全生命周期的制度保障体系。建议健全人工智能技术应用的法律法规,明确技术应用规范与伦理边界,确保人工智能在创新链布局重构中的安全性与可控性。推动人工智能技术监管与行业标准化建设,形成对人工智能嵌入的规范化指导与激励机制。同时,完善人工智能技术的知识产权保护制度,激发企业和科研机构的创新活力。加强国际合作,积极参与人工智能技术与创新链构建的全球治理,推动“中国智慧”在国际标准制定中的话语权提升。通过制度保障和规范引导,确保人工智能嵌入在技术创新与产业协同中的可持续性、高效性,为构建自主可控的创新链体系提供坚实的制度基础。

参考文献

- [1]陈东,秦子洋.人工智能与包容性增长——来自全球工业机器人使用的证据[J].北京:经济研究,2022,(4):85-102.
- [2]姚加权,张锐澎,郭李鹏,冯绪.人工智能如何提升企业生产效率?——基于劳动力技能结构调整的视角[J].北京:管理世界,2024,(2):101-116,133,117-122.
- [3]王林辉,胡晟明,董直庆.人工智能技术、任务属性与职业可替代风险:来自微观层面的经验证据[J].北京:管理世界,2022,(7):60-79.
- [4]宋华,韩梦玮,沈凌云.人工智能在供应链韧性塑造中的作用——基于迈创全球售后供应链管理实践的案例研究[J].北

京:中国工业经济,2024,(5):174-192.

[5] Tian, H. N., L. Y. Zhao, Y. F. Li, and W. Wang. Can Enterprise Green Technology Innovation Performance Achieve “Corner Overtaking” by Using Artificial Intelligence? Evidence from Chinese Manufacturing Enterprises[J].Technological Forecasting and Social Change,2023,194,(9):1-14.

[6] Zhong, Y. F., X. S. Chen, Z. X. Wang, and R. F. Y. Lin. The Nexus Among Artificial Intelligence, Supply Chain and Energy Sustainability: A Time-varying Analysis[J].Energy Economics,2024,132,(4):1-10.

[7] 吴涵,郭凯明.双循环视角下要素市场化配置、产业结构转型与劳动生产率增长[J].北京:经济研究,2023,(9):61-78.

[8] 陈艳利,蒋琪.数据生产要素视角下开放公共数据与企业创新——基于建立公共数据开放平台的准自然实验[J].北京:经济管理,2024,(1):25-46.

[9] Bahoo, S., M. Cucculelli, and D. Qamar. Artificial Intelligence and Corporate Innovation: A Review and Research Agenda[J].Technological Forecasting and Social Change,2023,188,(3):1-32.

[10] Sahoo, S., S. Kumar, N. Donthu, and A. K. Singh. Artificial Intelligence Capabilities, Open Innovation, and Business Performance—Empirical Insights from Multinational B2B Companies[J].Industrial Marketing Management,2024,117,(2):28-41.

[11] Sadeghi, K. R., D. Ojha, P. Kaur, R. V. Mahto, and A. Dhir. Explainable Artificial Intelligence and Agile Decision-making in Supply Chain Cyber Resilience[J].Decision Support Systems,2024,180,(5):1-10.

[12] Nahar, S. Modeling the Effects of Artificial Intelligence (AI)-based Innovation on Sustainable Development Goals (SDGs): Applying a System Dynamics Perspective in a Cross-country Setting[J].Technological Forecasting and Social Change,2024,201,(4):1-27.

[13] 尹志锋,曹爱家,郭家宝,郭冬梅.基于专利数据的人工智能就业效应研究——来自中关村企业的微观证据[J].北京:中国工业经济,2023,(5):137-154.

[14] 程文.人工智能、索洛悖论与高质量发展:通用目的技术扩散的视角[J].北京:经济研究,2021,(10):22-38.

[15] 张杰,付奎.创新制度改革与城市全要素生产率提升——来自全面创新改革试验区的经验证据[J].南京:现代经济探讨,2021,(9):26-35.

[16] 杨俊,李小明,黄守军.大数据、技术进步与经济增长——大数据作为生产要素的一个内生增长理论[J].北京:经济研究,2022,(4):103-119.

[17] 刘鑫鑫,韩先锋.人工智能与制造业韧性:内在机制与实证检验[J].北京:经济管理,2023,(11):48-67.

[18] 何宇,陈珍珍,张建华.人工智能技术应用与全球价值链竞争[J].北京:中国工业经济,2021,(10):117-135.

[19] 武建龙,王宏起.战略性新兴产业突破性技术创新路径研究——基于模块化视角[J].北京:科学学研究,2014,(4):508-518.

[20] 黄浩权,戴天仕,沈军.人工智能发展、干中学效应与技能溢价——基于内生技术进步模型的分析[J].北京:中国工业经济,2024,(2):99-117.

[21] 贾卫峰,李尚蓉,王艺宁.产业政策视角下数字技术对产业链与创新链融合的影响[J].武汉:科技进步与对策,2024,(7):1-13.

[22] Khatib, A. W. Drivers of Generative Artificial Intelligence to Fostering Exploitative and Exploratory Innovation: A TOE Framework[J].Technology in Society,2023,75,(11):1-12.

[23] 杨汝岱,李艳,孟珊珊.企业数字化发展、全要素生产率与产业链溢出效应[J].北京:经济研究,2023,(11):44-61.

[24] 田秀娟,李睿.数字技术赋能实体经济转型发展——基于熊彼特内生增长理论的分析框架[J].北京:管理世界,2022,(5):56-73.

[25] Liu, H. D., H. F. Zhao, and S. Y. Li. Future Social Change of Manufacturing and Service Industries: Service-oriented Manufacturing under the Integration of Innovation-flows Drive[J].Technological Forecasting and Social Change,2023,196,(11):1-32.

[26] 潘珊,郭凯明.人工智能、岗位结构变迁与服务型制造[J].北京:中国工业经济,2024,(4):57-75.

[27] 张洪胜,杜雨彤,张小龙.产业数字化与国内大循环[J].北京:经济研究,2024,(5):97-115.

[28] 陈劲,谢雨轩,李振东,梅亮.新时代下创新链内涵及理论体系建构[J].北京:科学学研究,2024,(7):1-16.

[29] 吕越,谷玮,尉亚宁,包群.人工智能与全球价值链网络深化[J].北京:数量经济技术经济研究,2023,(1):128-151.

[30] 罗晨晨,张智勇,文传浩.构建全域现代化生态产业体系:多维逻辑、理论框架与实现机制[J].重庆:改革,2024,(6):147-163.

[31] 曲冠楠,陈凯华,陈劲.面向新发展格局的意义导向“创新链”管理[J].北京:科学学研究,2023,(1):134-142,180.

[32] 陆明,杨德明.全产业链布局会提高企业创新产出吗[J].北京:经济管理,2024,(3):128-147.

- [33]吕越,张昊天,高恺琳.人工智能时代的中国产业链“延链补链”——基于制造业企业智能设备进口的微观证据[J].北京:中国工业经济,2024,(1):56-74.
- [34]Wamba, S.F., M.M.Queiroz, and L.Trinchera.The Role of Artificial Intelligence-enabled Dynamic Capability on Environmental Performance: The Mediation Effect of a Data-driven Culture in France and the USA [J].International Journal of Production Economics, 2024, 268, (2): 1-13.
- [35]Mariani, M.M., I.Machado, V.Magrelli, and Y.K.Dwivedi.Artificial Intelligence in Innovation Research: A Systematic Review, Conceptual Framework, and Future Research Directions[J].Technovation, 2023, 122, (4): 1-25.
- [36]Rammer, C., G.P.Fernandez, and D.Czarnitzki.Artificial Intelligence and Industrial Innovation: Evidence from German Firm-level Data[J].Research Policy, 2022, 51, (7): 1-15.
- [37]张杰,范雨婷.创新投入与企业韧性:内在机制与产业链协同[J].北京:经济管理,2024,(5):51-71.
- [38]李金城.工业智能化的产业链韧性提升效应:理论机制与经验证据[J].重庆:改革,2024,(7):1-15.
- [39]Haefner, N., V.Parida, O.Gassmann, and J.Wincet.Implementing and Scaling Artificial Intelligence: A review, Framework, and Research Agenda[J].Technological Forecasting and Social Change, 2023, 197, (12): 1-11.
- [40]江小涓,靳景.数字技术提升经济效率:服务分工、产业协同和数实共生[J].北京:管理世界,2022,(12):9-26.
- [41]Obreja, D.M., R.Rughinis, and D.Rosner.Mapping the Conceptual Structure of Innovation in Artificial Intelligence Research: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review[J].Journal of Innovation & Knowledge, 2024, 9, (1): 1-15.
- [42]Liu, J., H.H.Chang, J.Y.L.Forrest, and B.H.Yang.Influence of Artificial Intelligence on Technological Innovation: Evidence from the Panel Data of Chinese Manufacturing Sectors[J].Technological Forecasting and Social Change, 2020, 158, (9): 1-11.
- [43]刘斌,潘彤.人工智能对制造业价值链分工的影响效应研究[J].北京:数量经济技术经济研究,2020,(10):24-44.
- [44]任英华,刘宇钊,李海彤.人工智能技术创新与企业全要素生产率[J].北京:经济管理,2023,(9):50-67.
- [45]李玥,邓倩玉,王卓.战略性新兴产业创新链与服务链融合因素及作用机制研究[J].北京:科研管理,2023,(11):64-73.
- [46]邸晓燕,张赤东.基于产业创新链视角的智能产业技术创新力分析:以大数据产业为例[J].北京:中国软科学,2018,(5): 39-48.
- [47]陈强远,殷赏,程芸倩,孙久文.围绕创新链布局产业链:基于中关村科技园周边新企业进入的分析[J].北京:中国工业经济,2024,(1):75-92.
- [48]陈凤仙.人工智能发展水平测度方法研究进展[J].北京:经济动态,2022,(2):142-158.
- [49]孙早,侯玉琳.人工智能发展对产业全要素生产率的影响——一个基于中国制造业的经验研究[J].成都:经济学家, 2021,(1):32-42.
- [50]杨仁发,郑媛媛.数字经济发展对全球价值链分工演进及韧性影响研究[J].北京:数量经济技术经济研究,2023,(8):69-89.
- [51]张杰,付奎.创新制度改革与城市全要素生产率提升——来自全面创新改革试验区的经验证据[J].南京:现代经济探讨, 2021,(9):26-35.
- [52]程文.人工智能、索洛悖论与高质量发展:通用目的技术扩散的视角[J].北京:经济研究,2021,(10):22-38.
- [53]Teece, D.J.Profit from Technological Innovation: Implications for Integration, Collaboration, Licensing and Public Policy[J]. Research Policy, 1986, 15, (6): 285-305.
- [54]Nelson, R. R., and S. G. Winter. An Evolutionary Theory of Economic Change [M]. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1982.
- [55]Dosi, G. Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation. Journal of Economic Literature, 1988, 26, (3): 1120-1171.
- [56]Rammer, C., G.P.Fernández, and D.Czarnitzki. Artificial Intelligence and Industrial Innovation: Evidence from German Firm-level Data[J].Research Policy, 2022, 51, (7), 104545.
- [57]Shan, H.M., D.F.Bai, Y.Li, J.Shi, and S.H.Yang.Supply Chain Partnership and Innovation Performance of Manufacturing Firms: Mediating Effect of Knowledge Sharing and Moderating Effect of Knowledge Distance[J].Journal of Innovation & Knowledge, 2023, 8, (4): 1-12.
- [58]Omoush, K.S., A.D.Lucas, and M.T.d.Val.The Role of E-supply Chain Collaboration in Collaborative Innovation and Value-co Creation[J].Journal of Business Research, 2023, 158, (3): 1-10.

How does Artificial Intelligence Embedding Promote Layout Reconstruction of Innovation Chain? Empirical Test on the “Stuck Neck” Technology

PANG Lei¹, JIAO Shi-jie¹, LI Zheng-biao²

(1.School of Economics and Management, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan, 650500, China;

2.Business School, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, Yunnan, 650221, China)

Abstract: The embedding of artificial intelligence (AI) represents a pivotal pathway for reshaping the innovation chain layout in the context of the digital economy. This study, grounded in the perspective of “Stuck Neck” technologies, investigates the mechanisms through which AI integration impacts the reconstruction of innovation chain layouts and their subsequent value extension. Utilizing panel data from 35 industries in China spanning 2013 to 2023, sourced from databases such as Guotai-An and Wind, the research constructs indices to quantify the extent of AI embedding and the effectiveness of innovation chain layout reconstruction. The findings reveal that AI embedding significantly propels the reconstruction of innovation chain layouts by fostering the integration of innovation elements and enabling technological synergy across industries. It is established that AI embedding drives value extension within the innovation chain, particularly in capital-intensive industries, which exhibit the highest efficiency in layout reconstruction, followed by technology-intensive industries, whereas labor-intensive industries demonstrate a suppressive effect. Furthermore, AI embedding exerts the most substantial impact on the front-end of the innovation chain, with diminishing effects observed in the intermediary and back-end segments. Regions with advanced factor markets and high-tech industries exhibit stronger responsiveness to AI embedding in terms of innovation chain layout reconstruction. These findings underscore the strategic importance of AI embedding in addressing the bottlenecks of “Stuck Neck” technologies, offering valuable insights into the optimization of innovation chain structures under the constraints of external technological dependencies.

The empirical analysis further elucidates the mechanisms through which AI embedding influences the innovation chain layout. First, AI embedding enhances the spatial integration of innovation elements by optimizing data flow, algorithm application, and computational power deployment across the innovation chain. This integration enables precise allocation of key inputs such as human capital, R&D investment, and digital infrastructure, thus fostering the convergence of upstream, intermediary, and downstream innovation activities. Second, AI embedding facilitates technological synergy within and across industries by promoting the seamless interaction of production, R&D, and market-oriented activities. This technological alignment accelerates the transformation of theoretical innovations into scalable industrial applications, thereby boosting the overall productivity of the innovation chain. Third, the research uncovers significant heterogeneity in the effects of AI embedding across industries and regions. Capital-intensive industries leverage AI to enhance resource allocation and innovation efficiency, while technology-intensive industries benefit from the deep integration of AI in advancing core technological breakthroughs. Conversely, labor-intensive industries face structural constraints that limit their capacity to fully harness the potential of AI embedding, thereby inhibiting innovation chain restructuring. Regional disparities further highlight the critical role of factor market development and institutional support in amplifying the impact of AI embedding, as regions with advanced infrastructure and supportive policy environments demonstrate superior performance in innovation chain reconstruction.

The study extends its analysis to examine the implications of AI embedding for the value extension of “Stuck Neck” innovation chains, focusing on the dual dimensions of value extension length and width. The results indicate that AI embedding significantly enhances the length of value extension by improving the efficiency of technological transformation, cross-border knowledge exchange. AI embedding facilitates the intelligent coupling of innovation chain segments, enabling the seamless transfer of key inputs and outputs across spatial and organizational boundaries. However, the impact on the width of value extension, which reflects the scalability of high-tech product production, is comparatively constrained. This limitation arises from systemic losses in critical inputs during cross-border interactions and the inherent challenges in scaling up technological innovations to broader industrial applications. These findings highlight the transformative potential of AI embedding in optimizing the structural dynamics of innovation chains, while also emphasizing the need for targeted interventions to address the persistent gaps in technological diffusion and value creation. By providing a comprehensive theoretical and empirical framework, this study contributes to the ongoing discourse on leveraging AI to overcome technological bottlenecks, offering actionable insights for policymakers and industry stakeholders to enhance the resilience and competitiveness of national innovation systems.

Key Words: innovation chain; artificial intelligence integration; “Stuck Neck” technology; layout restructuring; value extension

JEL Classification: C51, O33

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2025.03.002

(责任编辑:张任之)