

机器人应用对产业链创新链融合的影响研究

张本秀 吴福象

内容提要:本文基于竞争成功函数和相容利益假设构建产业链创新链互动理论模型,从资本积累和就业极化两方面分析机器人应用对产业链创新链融合的影响,并使用中国2006—2021年的省级面板数据,构建计量模型进行实证研究。研究结果显示:机器人应用能够促进产业链创新链融合,主要作用机制包括资本积累效应和就业极化效应;进一步地,在积极应用机器人、就业政策完善的欠发达地区和创新基础薄弱的行业中,机器人应用对产业链创新链融合的促进作用更大,且以不同规模企业为主体的产业链创新链融合均受到机器人应用的促进。本文主要揭示了机器人应用对产业链创新链融合的作用机制和异质性影响,可为优化产业创新发展环境提供经验支撑与政策依据。

关键词:机器人应用 产业链 创新链 资本积累 就业极化

中图分类号:F426

文献标识码:A

文章编号:1000-7636(2024)02-0021-20

一、问题提出

推动产业链创新链(“双链”)融合,打通产业实体经济与先进制造技术间的壁垒,是全球产业变革趋势下中国产业发展的主攻方向。现阶段,以美国为主导的高技术“靶向脱钩”和发达国家的供应链多元化布局,迫使中国制造业面临技术封锁和市场挤压的双重困境,亟须释放产业创新变革优势。与此同时,以人工智能为核心的新一代信息技术迅速崛起,机器人成为先进制造业不可或缺的自动化设备,为产业高质量发展提供技术支撑,推动“中国制造”走向“中国创造”。机器人应用能够有效服务于汽车、航空航天和轨道交通等领域,满足先进制造领域的转型发展需求。在政策和市场需求的双重驱动下,机器人在国内行业的应用率日渐提升,其应用场景持续丰富。机器人应用促进制造业推广智能生产模式,推动产业链创新链深度融合。

自2013年以来,习近平总书记多次针对产业链与创新链融合发展发表重要论述,提出要“围绕产业链部署创新链”“围绕创新链布局产业链”,强调了产业链与创新链环节相扣、融合发展的重要性。关于产业链

收稿日期:2023-04-29;修回日期:2023-12-16

基金项目:国家社会科学基金重大项目“中国深度参与全球创新链治理的机制、路径与政策研究”(20&ZD123);国家自然科学基金面上项目“中国制造业关键核心技术创新突破及实现路径研究”(72073061)

作者简介:张本秀 南京大学经济学院博士研究生,南京,210093;

吴福象 南京大学经济学院/长三角研究中心教授、博士生导师。

作者感谢匿名审稿人的评审意见。

创新链融合的理论内涵,可从两方面来诠释:一方面,从“链式结构”出发,产业链创新链融合是分别以产品生产和技术创新为主的两类链条如同脱氧核糖核酸(DNA)螺旋结构般相互嵌套的过程,此过程中产业体系同创新基础相适配、产业转型发展同技术进步趋势相协同,表现为“双链”各个环节的复杂互动^[1];另一方面,从“双链”主体出发,产业链创新链融合则使生产主体和创新主体在产业链关键环节和创新链前沿环节中达成创新合作,以市场需求引领技术攻关,以创新成果推动生产升级,二者在前期投入、平台搭建、项目合作等方面达成协作与整合,最终实现产业体系转型与创新模式升级齐头并进。所以,产业链创新链融合本质上表现为生产主体和创新主体的融合、产业发展与科技创新的融合,以及产业科技化与科技产业化的融合。脱离产业的科技创新无法有效跨越从“实验室”到“生产线”的鸿沟,脱离创新的产业发展难以成为中国应对全球产业链重构和高技术“靶向”脱钩的破局之策。因此,以产业链创新链融合为抓手,方能破解中国产业“有高原无高峰”的桎梏。

已有文献对于产业链和创新链的研究主要集中在论述概念和阐明二者融合关系方面。“产业链”一词主要源自傅国华(1996)^[2]对海南热带农业的研究,后有学者将其定义为经济活动中各产业依据前、后向关联关系所组成的网络结构^[3-4]。从构成部分来看,可将产业链分解为多个相关产业或相邻市场的关系^[5]。从生产关系来看,也可将产业链抽象地理解为产业内“点”和“线”的划分与连接,“点”代表不同的生产节点,“线”则概括产业链中不同环节企业的“线性连接”,产业链的载体和具体表现形式即在于“点”和“线”的连接^[6]。随着研究的丰富与深入,产业链被进一步定义为不同产业部门之间基于技术经济关联、特定逻辑联系和时空布局关系所客观形成的链式关系形态^[7-8]。创新链的思想则源于产业链的相关研究。例如,林森等(2001)从技术和产业的关系出发,认为创新链涵盖了科研成果从选题到产业化的完整技术过程^[9]。代明等(2009)提出创新链是一条以创新为纽带,各功能节点合作研发、知识互补的链条^[10]。在产业链创新链融合视角下,创新链被定义为包含基础研究、技术研发、成果转化、规模化生产等环节于一体的综合性链条,其突出特征在于重视市场需求、价值增值和资源整合^[11]。

推动产业链创新链融合,即按照市场需求整合生产要素和创新要素,不仅要加强生产技术需求调研,针对产业链薄弱环节进行针对性技术研究,还要加速技术成果产业化,以前沿技术引领产业升级发展^[12]。作为生产主体的企业和科研院所合作,在提升内部研发效率的同时,也能加速自身创新能力的提高以及新专利的产生^[13]。同样,在产学研合作中,高校的技术研究也能为企业生产技术革新注入活力^[14]。但产业链创新链融合是一项长期性、系统性的工程,易受多种因素影响而陷入相互割裂状态^[15]。因此,推动产业链创新链融合需要政府从战略层面进行统筹引导,比如洪银兴(2019)强调要围绕核心高端技术组建产业链,并进一步围绕产业链建立创新链,通过产业链和创新链的深度融合来创造作为国之重器的核心技术^[16]。近年来,针对产业链创新链融合的研究进一步细化,细分行业的产业链创新链融合关系及可行路径得到关注^[1]。还有学者尝试构建产业链创新链融合的评价指标体系,科学衡量产业链创新链融合程度^[17],为从实证层面研究产业链创新链融合的影响因素和经济效应提供了重要参考。

总体来看,已有文献虽阐述了产业链和创新链的相关概念,并针对二者融合关系进行研究,但存在两点不足:一是对产业链创新链融合的研究偏向于定性研究,鲜少对产业链创新链融合的影响因素进行实证检验,不利于从实践层面构建产业链与创新链协同演进的现实路径;二是机器人的广泛应用为产业链创新链融合创造了更好的技术条件,但现有研究无论是从理论层面还是实证层面均缺乏对机器人应用和产业链创新链融合关系的考察,无法更深层次地理解机器人应用驱动产业创新发展的动力所在。基于此,本文建立理论模型,分析机器人应用对产业链创新链融合的影响,并对作用机制和异质性影响进行实证检验,边际贡

献主要体现在以下方面:(1)研究内容方面,明确了机器人应用对产业链创新链融合的促进性作用,理性探讨机器人冲击下不同要素替代效应对产业链创新链融合的影响,扩展了已有文献对相关问题的研究边界;(2)理论分析方面,基于竞争成功函数和相容利益假设构建产业链创新链互动理论模型,探讨机器人应用的资本积累效应和就业极化效应对产业链创新链融合的影响,明确机器人应用影响产业链创新链融合的内在机制;(3)实证研究方面,对机器人应用影响产业链创新链融合的作用机制进行实证检验,并分别在地区、行业和企业层面进行异质性分析,贴近当前国内不同地区、行业和企业引进机器人等先进设备的现实场景。本文的研究有助于正确认识机器人应用对产业创新发展的影响,协调好生产主体与创新主体的关系,发挥机器人应用的技术红利,尽可能规避机器人冲击所带来的消极影响,进而对促进产业链创新链融合和稳固高质量发展动力提供有益的政策启示。

二、理论模型与研究假设

机器人大规模应用于产业中,以智能化生产提高生产效率的同时,也会引起产业内部不同要素间的替代效应。其一,资本要素替代劳动要素,在产业内部形成资本积累效应。随着机器人的应用,生产者投入大量智能资本来满足创新发展需求,资本相较于劳动变得更加重要,资本回报率也相应提高^[18]。其二,技术要素替代劳动要素,表现为“机器换人”现象。重复且危险的生产任务逐渐由先进机器代替人力劳动来完成^[19],技术水平的提升也以优化生产体系的方式节省人力,总体表现为技术要素对劳动要素产生了“挤出效应”。为了分析机器人应用所导致的上述两种效应对产业链创新链融合的影响,本文借鉴叶光亮等(2022)对两类主体互动关系的模型设定^[20],构建产业链创新链互动理论模型。具体来说,本文先分析生产主体行为,以非公平形式的竞争成功函数刻画机器人应用的资本积累效应和就业极化效应所引起的生产主体差异化竞争行为,再分析创新主体行为,基于相容利益假设将创新主体同生产主体相联系,以此探讨机器人应用对产业链创新链融合的影响及作用机制。

(一) 生产主体与创新主体行为分析

产业链创新链融合在理论层面被诠释为两类链式结构相互嵌套、复杂互动的过程,在实际生产与研发活动中,则表现为生产主体和创新主体的创新合作与资源整合。本文将生产主体界定为以盈利为目标,通过开展生产活动、升级生产技术来提供产品和服务,进而满足市场需求的组织体系,这类主体以企业为主;将创新主体界定为以技术革新为目标,通过开展研发活动、深耕基础研究和应用研究领域,进而突破技术瓶颈、产出研发成果的组织体系,这类主体以研发机构、实验室等为主。值得注意的是,随着创新需求日渐提升,越来越多的企业开始自设研发机构进而对生产技术进行升级革新,在本文的概念界定中,这类企业同时承担生产主体和创新主体双重角色。针对这种情况,本文将这类企业的生产环节划分为生产主体行为,研发环节划分为创新主体行为,以此来明确区分这类企业不同职能部门的所属主体,避免出现歧义。另外,产业链创新链融合的根本目标是促进创新链的研发成果转化,支撑产业发展的需求升级,推动产业链上生产主体的生产技术革新。因此,在产业链创新链融合中,生产主体和创新主体的主要融合形式表现为创新合作。下文将基于竞争成功函数和相容利益假设对生产主体和创新主体行为展开分析。

首先,对于生产主体而言,其引入新技术以提高生产效率和管理水平,进而提升市场竞争力,获得更多收益,此种行为被称为市场化努力。在市场经济中,生产主体付出市场化努力来竞争市场份额,为了刻画这种市场竞争关系,本文引入了竞争成功函数。竞争成功函数由布坎南等(Buchanan et al., 1980)^[21]提

出,为通过努力来竞争优胜的相关问题建模,而本文关注产业链上生产主体的行为,所涉及的市场竞争本质上也是竞争优胜问题。本文所采用的竞争成功函数基础形式为什卡佩尔达斯(Skaperdas, 1996)^[22]所提出的连续幂函数形式:

$$p_i(e_i, e_{-i}) = \frac{e_i^r}{\sum_{j=1}^N e_j^r}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式(1)中, e 表示生产主体的市场化努力水平, p_i 表示生产主体 i 的市场份额, r 表示生产主体通过市场化努力获得收益的难易程度, $r > 0$ 。由于不同的技术条件、政策偏向等情况存在差异,市场竞争通常表现为非公平形式。据此,克拉克和里斯(Clark & Riis, 1998)^[23]在式(1)的基础上进一步提出了非公平竞争成功函数形式:

$$p_i(e_i, e_{-i}) = \frac{k_i e_i^r}{\sum_{j=1}^N k_j e_j^r}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式(2)中, k_i 反映了不公平因素对不同生产主体市场份额的影响。现阶段,机器人的应用日渐广泛,越来越多的生产主体因此而受益,在技术条件、生产效率和管理优化等方面获得改善。本文假设市场中有两类竞争性生产主体,其中,生产主体1应用了机器人,生产主体2未应用机器人,那么两类生产主体的市场份额将表现为非公平竞争成功函数形式:

$$p_1(e_1, e_2) = \frac{k_1 e_1^r}{k_1 e_1^r + k_2 e_2^r}, p_2(e_1, e_2) = \frac{k_2 e_2^r}{k_1 e_1^r + k_2 e_2^r} \quad (3)$$

在产业链创新链融合中,生产主体同创新主体的融合形式主要表现为创新合作,其所带来的生产技术创新能够提升生产主体的收益。假设生产主体同创新主体的创新合作为 M ,其中完全服务于生产技术创新的比例为 μ ,技术创新所带来的收益增加具有乘数效应^[24],因此以 $M/(1-\mu)$ 来衡量创新合作下生产技术创新所带来的收益扩大作用。由此,生产主体1和生产主体2的净收益函数为:

$$Y_1 = \frac{k_1 e_1^r}{k_1 e_1^r + k_2 e_2^r} \times \frac{M}{1-\mu} - c e_1, Y_2 = \frac{k_2 e_2^r}{k_1 e_1^r + k_2 e_2^r} \times \frac{M}{1-\mu} - c e_2 \quad (4)$$

式(4)中, c 表示固定的边际努力成本。每个生产主体都选择可以获得最大净收益的最优市场化努力程度,根据一阶条件可以解得最优市场化努力程度为:

$$e_1 = e_2 = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \times \frac{r}{c} \times \frac{M}{1-\mu} \quad (5)$$

那么,最优市场总努力水平为:

$$E = \frac{2k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \times \frac{r}{c} \times \frac{M}{1-\mu} \quad (6)$$

其次,对于创新主体而言,在产业链创新链融合视角下,其与生产主体合作以获得收益,进而支持自身进一步的研发工作。具体来说,创新主体的相容利益来源于两方面:一是创新主体获得的研发报酬。追求利益的生产主体付出较大的市场化努力,积极改进生产技术,同创新主体合作的意愿强,创新主体在合作中可以获得研发报酬。这部分收益与生产主体的市场化努力正相关,权重为 ρ ,正相关系数可用 λ 表示。二是创新主体自身发展的收益。在与生产主体创新合作的过程中,创新主体自身的研发工作也得到了持续性的资金保障,有助于研发成果的产出和转化应用,对于创新主体申请专利以及创新基金皆有促进性作用,这部

分收益权重为 $1-\rho$ 。

假设创新主体的全部研发工作量为 I , 前文已将创新主体完全服务于生产主体技术创新的研发工作划分为 μM , 那么创新主体自身的发展空间为 $I-\mu M$ 。参考皮建才(2012)^[25]的做法, 以创新主体自身发展空间的对数形式衡量自身发展收益, 即 $\ln(I-\mu M)$ 。假设创新主体研发工作的边际成本为 1, 则其研发工作的总成本为 I 。那么, 创新主体的收益函数为:

$$R = \rho\lambda E + (1 - \rho)\ln(I - \mu M) - I \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)可得:

$$R = \frac{2\rho\lambda k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2} \times \frac{r}{c} \times \frac{M}{1 - \mu} + (1 - \rho)\ln(I - \mu M) - I \quad (8)$$

对式(8)求一阶导数, 可得创新主体共容利益最大化目标下, 生产主体同创新主体的创新合作程度:

$$M^* = \frac{I}{\mu} - \frac{(k_1 + k_2)^2(1 - \mu)(1 - \rho)c}{2\rho\lambda r k_1 k_2} \quad (9)$$

其中, M^* 即为机器人部分应用于生产主体 1 的情况下, 生产主体同创新主体的创新合作程度, 即产业链创新链融合程度。

(二) 资本积累效应的影响

机器人的应用提升了资产回报率, 产生了资本积累效应^[26]。生产主体的资本积累对于其提高投资、扩大生产、增加盈利具有积极作用, 也影响其与创新主体间的合作行为。在链式结构视角下, 机器人先应用于部分生产主体, 不仅在其内部产生了资本积累效应, 也通过产业链上下游生产主体间的生产分工、要素流动、追加投资等方式, 产生了一定的资本溢出效应, 进而促使机器人应用所带来的资本积累效应惠及全产业链, 以改进技术和提高生产效率的形式提升了相关产品的质量, 相关生产主体因此获得更多市场收益。机器人应用所产生的资本积累效应惠及全产业链, 强调普惠性、弱化竞争性, 对于所有生产主体的市场收益具有正向扩大作用。因此, 竞争成功函数中市场化努力系数 $k_i = 1$, 生产主体 1 和生产主体 2 的市场份额为:

$$p_1(e_1, e_2) = \frac{e_1^r}{e_1^r + e_2^r}, p_2(e_1, e_2) = \frac{e_2^r}{e_1^r + e_2^r} \quad (10)$$

资本积累效应对所有生产主体的市场收益均产生了正向扩大作用, 因此在生产主体 1 和生产主体 2 的净收益函数中引入大于 1 的正数 l 以表示资本积累效应的正向影响:

$$Y_1 = \frac{le_1^r}{e_1^r + e_2^r} \times \frac{M}{1 - \mu} - ce_1, Y_2 = \frac{le_2^r}{e_1^r + e_2^r} \times \frac{M}{1 - \mu} - ce_2 \quad (11)$$

通过求净收益函数的一阶导数解得净收益最大化条件下的 e_1 与 e_2 , 加总即得最优市场总努力水平 E :

$$E = 2l^2 \frac{r}{c} \times \frac{M}{1 - \mu} \quad (12)$$

将 E 代入创新主体的收益函数:

$$R = \frac{\rho\lambda l}{2} \times \frac{r}{c} \times \frac{M}{1 - \mu} + (1 - \rho)\ln(I - \mu M) - I \quad (13)$$

求其一阶导数, 解得创新主体收益最大化条件下的 M^* 为:

$$M^* = \frac{I}{\mu} - \frac{2c(1 - \mu)(1 - \rho)}{\rho\lambda lr} \quad (14)$$

其中, $\frac{\partial M^*}{\partial l} > 0$, 这说明机器人应用所产生的资本积累效应提升了生产主体的收益, 对其提高投资、扩大生产等生产活动具有积极作用, 进而促使生产主体同创新主体的合作更加活跃。

据此, 本文提出假设 1: 机器人应用所产生的资本积累效应促使生产主体同创新主体的创新合作更加活跃, 即促进了产业链创新链融合。

(三) 就业极化效应的影响

机器人可替代简单重复性劳动, 挤出低技能劳动力, 而高技能劳动力所受影响却不大, 促使就业结构偏向极化, 进一步影响了劳动力的收入差距和消费结构^[27]。具体来说, 高技能劳动力的收入较高, 其岗位也得以保留, 而低技能劳动力不仅收入水平较低, 更是在机器人的冲击下面临失业问题, 那么高技能劳动力对高质量产品的消费基本不受影响; 相反, 主要消费群体是低技能劳动力的中低质量和中低档产品的销量将降低。此类消费冲击对产业链中已经应用和尚未应用工业机器人的生产主体产生差异化影响: 一方面, 机器人的应用会提高生产操作规范性、降低次品率, 提升产品质量, 吸引高技能劳动力消费, 从而提升生产主体的收益; 另一方面, 机器人之类的智能技术对互补性投入要求较高, 需要人力资源、产业结构等多方面条件予以支撑^[28]。产业链中先应用机器人的生产主体 1 通常是实力较强的龙头企业和链主企业, 生产的产品质量较高, 符合高技能劳动力的消费需求; 而无力应用机器人的生产主体 2 通常是经济实力较差的小微企业, 生产的产品通常是模仿创新的产物以及品质较差的替代商品, 受消费冲击较大。这两方面的影响在竞争成功函数中体现为:

$$p_1(e_1, e_2) = \frac{k_1 e_1^r}{k_1 e_1^r + e_2^r}, p_2(e_1, e_2) = \frac{e_2^r}{k_1 e_1^r + e_2^r} \quad (15)$$

式(15)中, $k_1 > 1$, 表示机器人应用引起的就业极化效应对生产主体 1 市场收益的影响为正。为了简化计算, 使结果更加直观, 式(15)中已假设 $k_2 = 1$ 。 $k_1 > 1$ 所带来的直接性影响为生产主体 1 的市场份额提升、生产主体 2 的市场份额下降, 同时体现出生产主体 2 所受到的不利影响。解得最优市场总努力水平 E 为:

$$E = \frac{2k_1}{(k_1 + 1)^2} \times \frac{r}{c} \times \frac{M}{1 - \mu} \quad (16)$$

代入创新主体的收益函数后, 解得创新主体收益最大化条件下的 M^* 为:

$$M^* = \frac{I}{\mu} - \frac{(k_1 + 1)^2 (1 - \mu) (1 - \rho) c}{2\rho\lambda r k_1} \quad (17)$$

$$\frac{\partial M^*}{\partial k_1} = -\frac{(1 - \mu) (1 - \rho) c}{2\rho\lambda r} \times \frac{k_1^2 - 1}{2k_1^2} \quad (18)$$

由式(18)可知, 当 $k_1 > 1$ 时, $\frac{\partial M^*}{\partial k_1} < 0$, 即机器人应用产生的就业极化效应对生产主体同创新主体间的创新合作产生负向影响。机器人应用所引起的就业结构极化促使收入差距扩大, 对低收入群体的消费产生冲击, 在产品市场引发不公平效应, 进而抑制了生产主体同创新主体合作以改进生产技术的倾向。产业链创新链融合需要产业链大中小企业协同参与, 龙头企业和链主企业“独大”不利于产业高质量创新发展。

据此, 本文提出假设 2: 机器人应用所产生的就业极化效应抑制了生产主体同创新主体的创新合作倾

向,即不利于产业链创新链融合。

三、研究设计与指标选择

(一) 数据来源

本文以 2006—2021 年中国省级面板数据为分析样本,研究机器人应用对产业链创新链融合的影响。数据来源于国家统计局、万得数据库、国际机器人联合会(IFR)、深圳希施玛数据科技有限公司 CSMAR 中国经济金融研究数据库、《中国统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、《中国高技术产业统计年鉴》和《中国金融年鉴》。内蒙古、西藏、青海、宁夏和新疆数据缺失严重,故剔除;其余省份部分年份数据缺失,本文采用线性插值法补齐。为消除异方差的影响,本文在回归分析中统一对绝对量作对数处理。

(二) 模型构建

本文基本计量模型设定如下:

$$degree_{it} = a_0 + a_1 robot_{it} + a_2 controls_{it} + \lambda_i + \theta_t + \varepsilon_{it} \quad (19)$$

其中, i 表示省份、 t 表示年份;被解释变量 $degree_{it}$ 表示省份 i 的高技术产业在第 t 年的产业链创新链融合程度,核心解释变量 $robot_{it}$ 表示省份 i 在第 t 年的机器人应用水平; λ_i 表示省份固定效应, θ_t 表示时间固定效应, ε_{it} 表示随机误差项; $controls_{it}$ 表示一系列控制变量,包括政府创新投入(gov)、对外贸易(for)、金融支持(fin)、科技成果产出(tec)、经济增长(gdp)。

为了验证机器人应用影响产业链创新链融合的作用机制,本文在式(19)的基础上进一步构建中介效应模型进行机制检验。本文的理论分析部分已就资本积累效应和就业极化效应对产业链创新链融合的影响进行模型层面的推导与证明,且已有研究分别基于理论研究、国别比较和实证分析等层面验证了资本积累和就业极化对产业创新发展和产业链创新链融合的影响,因此资本积累和就业极化对产业链创新链融合的影响已有理论支持^[29-33]。本文参考江艇(2022)^[34]的研究,仅验证机器人应用对资本积累和就业极化的影响。模型设计如下:

$$capital_{it} = \beta_0 + \beta_1 robot_{it} + \beta_2 controls_{it} + \lambda_i + \theta_t + \varepsilon_{it} \quad (20)$$

$$employ_{it} = \beta_0 + \beta_1 robot_{it} + \beta_2 controls_{it} + \lambda_i + \theta_t + \varepsilon_{it} \quad (21)$$

式(20)和式(21)中, $capital_{it}$ 表示资本积累, $employ_{it}$ 表示就业极化,二者为中介变量,其余变量定义与式(19)一致。

(三) 变量选取

1. 被解释变量:产业链创新链融合程度($degree$)

根据产业链创新链融合的理论内涵,本文着重从产业规模与创新规模相匹配、产业结构与创新结构相契合、产业链投入要素同创新链投入要素相耦合以及产业链同创新链融合方式相对接这四个层面构建产业链创新链融合的指标体系。其中,产业规模与创新规模相匹配是重要前提,只有在规模相适配的情况下,产业链的拉动力和创新链的推动力才能够达到良好的相互作用,避免要素投入在数量和质量上出现失衡问题;产业结构与创新结构相契合是根本保证,产业结构和创新结构间实现良好的协同匹配,才能促使“双链”有效衔接,避免出现发展梯度差异、承接能力不足等问题^[35];产业链投入要素同创新链投入要素相耦合是关键环节,人才、资金、技术等投入要素是产业链创新链融合的重要影响要素,产业链与创新链上各种要素在利益、目标上的交点与融合点,是实现“双链”投入有序、要素对接的落脚点^[36];产业链同创新链融合方式相

对接是终端落实,基于共性技术突破的需求,创新端需要依托产业链布局开展技术创新项目,产业端则需要完成创新成果的衔接与集成,在此过程中,采取恰当的融合方式且实现有效对接尤为重要,也是最终推动产业链创新链融合的落实步骤。

本文以各省份高技术产业的相关数据为基础,使用耦合协调模型来测算产业链创新链的耦合协调度,该模型准确反映了复杂系统中子系统相互依赖、协调发展的关系,客观揭示产业链创新链融合水平。计算步骤如下:

首先,构建产业链创新链耦合协调的综合评价指标体系。本文以不同层级的指标设计来反映规模相匹配、结构相契合、要素相耦合和方式相对接这四个产业链创新链融合指标维度,具体指标构成参见表1。在规模匹配方面,以企业数量和平均用工人数反映产业链规模,以研发机构数量和研发机构人员数量反映创新链规模;在结构契合方面,以技术改造经费占比和产业链升级衡量产业结构升级情况,以消化吸收经费占比和创新链演进衡量创新结构升级情况^①。其中,产业链升级主要以新产品主营业务收入占比来衡量,因为在市场导向下,推动产业链升级最终需落实到积极开发新产品和提升新产品附加值上^[37]。在创新链演进方面,洪银兴(2017)指出现阶段科技创新链前移到基础研究领域,由解决工艺问题转变为解决重大科学问题^[38],遵循这一观点,本文采用研究型人员占科技活动人员的比重衡量创新链演进情况;在要素耦合方面,着重从人才投入、资金投入和技术投入三方面进行考察,产业链的投入要素包括高受教育程度就业人员占比、产业投资和产业仪器设备投入,创新链的投入要素包括研发(R&D)人员全时当量、研发机构经费支出和研发机构仪器设备支出;在方式对接方面,产业链的新产品开发经费支出占比和购买境内技术经费支出反映产业端对技术成果的转化和技术引进情况^②,创新链的有效发明专利数占比和研发机构R&D项目数反映创新端研发成果的产出和技术转移情况。

表1 产业链创新链耦合协调评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
产业链	产业规模	企业数量/家
		平均用工人数/人
	产业结构	技术改造经费/科技活动经费企业资金/%
		产业链升级/%
	投入要素	高受教育程度就业人员占比/%
		产业投资/亿元
		产业的仪器设备投入/万元
融合方式	新产品开发经费支出/科技活动经费企业资金/%	
	购买境内技术经费支出/万元	

① 《中国高技术产业统计年鉴》对于技术改造经费和消化吸收经费的解释为:技术改造经费指企业将研发成果应用于生产的各个领域,用先进工艺、设备代替落后工艺、设备,提高产品质量、促进产品更新换代;消化吸收经费指对引进技术的掌握、应用、复制而开展的工作,以及在此基础上的创新。据此,本文将技术改造经费占比归类为产业结构层面的指标,将消化吸收经费占比归类为创新结构层面的指标。

② 这里选择购买境内技术经费支出占比而非引进技术经费占比来衡量技术引进情况的原因在于:引进技术经费中包括从国外购买、引进的技术经费,此部分无法反映产业链与国内研发机构的合作情况,故而选择更具针对性的购买境内技术经费支出占比来衡量来源于国内研发机构的技术引进情况。

表1(续)

一级指标	二级指标	三级指标
创新链	创新规模	研发机构数量/家 研发机构人员数量/人
	创新结构	消化吸收经费/科技活动经费内部支出/% 创新链演进/%
投入要素	融合方式	R&D 人员全时当量/人年 研发机构经费支出/万元 研发机构的仪器设备投入/万元
		有效发明专利数/专利申请数/% 研发机构 R&D 项目数/项

其次,利用熵值法确定各指标权重并计算产业链和创新链发展水平。假设产业链创新链耦合协调的综合评价指标体系中涉及 r 个年份、 m 个地区和 n 个指标,则 $x_{\alpha ij}$ 为第 α 年省份 i 的第 j 个指标值。由于评价指标体系所选取的测度指标计量单位、意义等存在差异,所以需要对所有指标进行标准化处理:

$$\begin{cases} r_{\alpha ij} = \frac{x_{\alpha ij} - \min(x_{\alpha ij})}{\max(x_{\alpha ij}) - \min(x_{\alpha ij})}, x_{\alpha ij} \text{ 为正向指标} \\ r_{\alpha ij} = \frac{\max(x_{\alpha ij}) - x_{\alpha ij}}{\max(x_{\alpha ij}) - \min(x_{\alpha ij})}, x_{\alpha ij} \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (22)$$

个别指标标准化处理后,可能会出现零值的情况,因此进行平移处理:

$$r_{\alpha ij} = r_{\alpha ij} + H, H = 1 \quad (23)$$

平移处理后,计算所有指标权重:

$$f_{\alpha ij} = \frac{r_{\alpha ij}}{\sum_{\alpha=1}^r \sum_{i=1}^m r_{\alpha ij}} \quad (24)$$

并对信息熵值 e_j 求解:

$$e_j = -\frac{1}{k} \sum_{\alpha=1}^r \sum_{i=1}^m f_{\alpha ij} \ln f_{\alpha ij}, k = \ln rm \quad (25)$$

第 j 项指标信息效用价值大小由该指标的信息熵大小决定,即信息效用值 h_j 满足 $h_j = 1 - e_j$,那么根据信息效用值 h_j 确定指标权重 w_j :

$$w_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (26)$$

即可计算发展水平 U_i :

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{\alpha ij} \quad (27)$$

借鉴物理学中的容量耦合系数模型,计算产业链创新链的耦合度和耦合协调度。产业链创新链耦合度

公式可表示为:

$$C = 2 \sqrt{\frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2}} \tag{28}$$

进一步地,计算综合协调指数 T 和耦合协调度 D :

$$T = b_1 U_1 + b_2 U_2, D = \sqrt{CT} \tag{29}$$

按照通常做法,本文认为产业链创新链对综合协调指数的贡献力度相同,因此 $b_1 = b_2 = 0.5$ 。表 2 展示了各省份 2006 年和 2021 年产业链创新链的耦合协调度及增长情况。就耦合协调度而言,多数省份的产业链与创新链之间已产生相互影响。江苏、浙江、广东等经济大省的耦合协调度处于较高水平,但也有部分省份的产业链创新链耦合协调度不高。就耦合协调度增长情况而言,相较于 2006 年,各省份 2021 年的产业链创新链耦合协调水平均保持增长趋势,说明各省份“双链”间的相互作用正在加深。这彰显了推动产业链创新链深度融合的必要性,也揭示了未来各省份的产业链创新链耦合协调水平有进一步优化的空间。

表 2 各省产业链创新链耦合协调情况

省份	2006 年耦合协调度	2021 年耦合协调度	协调度增长情况/%	省份	2006 年耦合协调度	2021 年耦合协调度	协调度增长情况/%
北京	0.336 6	0.488 9	45.25	山东	0.288 2	0.496 7	72.35
天津	0.340 3	0.411 0	20.78	河南	0.260 0	0.400 0	53.85
河北	0.253 5	0.398 3	57.12	湖北	0.270 6	0.435 2	60.83
山西	0.264 8	0.342 8	29.46	湖南	0.288 7	0.429 5	48.77
辽宁	0.280 7	0.374 2	33.31	广东	0.365 6	0.853 1	133.34
吉林	0.265 0	0.349 8	32.00	广西	0.276 5	0.326 4	18.05
黑龙江	0.256 0	0.394 4	54.06	海南	0.206 0	0.361 5	75.49
上海	0.353 2	0.449 7	27.32	重庆	0.310 8	0.384 0	23.55
江苏	0.340 6	0.654 6	92.19	四川	0.323 9	0.412 1	27.23
浙江	0.329 2	0.607 0	84.39	贵州	0.269 8	0.343 8	27.43
安徽	0.294 0	0.459 4	56.26	云南	0.256 8	0.290 4	13.08
福建	0.359 4	0.442 1	23.01	陕西	0.302 6	0.384 3	27.00
江西	0.273 2	0.421 6	54.32	甘肃	0.250 0	0.347 5	39.00

参考张鹏岩等(2017)^[39]的做法,本文进一步考察了不同省份在 2021 年的产业链创新链协调发展类型。表 3 显示,在本文测算的 26 个省份中,广东的产业链创新链达到了优质协调水平,江苏和浙江为中级协调,北京、上海、安徽等 11 省份为调和协调,河北、山西、重庆等 11 省份为勉强协调,云南为轻度不协调。总体来看,经济发达的省份有更为优越的产业升级基础和创新环境,其产业链创新链的协调发展水平相对更高。

表3 2021年各省份产业链创新链协调发展的类型分布情况

协调度区间	省份	协调发展类型
[0.8, 0.9)	广东	优质协调
[0.6, 0.7)	江苏、浙江	中级协调
[0.4, 0.5)	北京、天津、上海、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、四川	调和协调
[0.3, 0.4)	河北、山西、辽宁、吉林、黑龙江、广西、海南、重庆、贵州、陕西、甘肃	勉强协调
[0.2, 0.3)	云南	轻度不协调

2. 核心解释变量:机器人应用水平(*robot*)

本文以国际机器人联合会(IFR)公布的2006—2021年工业机器人数据为基础,参考陈媛媛等(2022)^[40]的指标测算方法,计算各省份人均工业机器人安装量,以此来衡量机器人应用水平。IFR自2006年开始提供中国分行业的工业机器人安装量数据,本文通过将IFR的行业分类同中国行业分类进行匹配与合并,得到19个行业的工业机器人安装量数据,包括农林牧渔业、采矿业、食品与饮料制造业、汽车制造业、其他运输设备制造业、塑料制品业和化工业、金属制品业、设备制造业、金属冶炼业、电子产品制造业、非金属矿物制品业、木材加工业、纺织业、造纸和印刷业、其他制造业、采矿业、教育和科研、建筑业与服务业。分别根据上述19个行业的全国就业人数、分省份就业人数和分省份总就业人数对全国分行业工业机器人安装量进行加权计算,汇总后得到分省份的人均工业机器人安装量,具体计算公式为:

$$robot_{it} = \sum_{l \in L} ratio_{il,2005} \frac{robots_{lt}}{emp_{l,2005}} \quad (30)$$

式(30)中, i 表示省份, l 表示行业, t 表示年份。 $robots_{lt}$ 衡量全国层面 l 行业在 t 时期的工业机器人安装量, $emp_{l,2005}$ 代表2005年全国层面 l 行业的就业人数, $ratio_{il,2005}$ 表示2005年 i 省份 l 行业的就业人数占 i 省份总就业人数的比例,即 $ratio_{il,2005} = emp_{il,2005} / emp_{i,2005}$ 。在计算人均工业机器人安装量过程中,全国层面分行业就业人数的数据来源于世界生产率与经济增长国际比较数据库(World KLEMS),不同省份的总就业人数和分行业就业人数的数据来源于2005年1%人口抽样调查微观数据。其中,就业相关的变量之所以选择2005年的数据,是为了避免由于工业机器人对劳动力市场存在影响,进而影响产业链创新链融合,以此保证本文研究结论的准确性。

此外,本文以资本积累(*capital*)和就业极化(*employ*)作为中介变量,其中资本积累采用规模以上工业企业的资产规模表示,就业极化采用高技能劳动力人数与低技能劳动力人数之比来表示,研究生与大学本、专科人员为高技能劳动力,小学及以下学历的人员则为低技能劳动力。本文还在方程中加入了以下省份层面的控制变量:政府创新投入(*gov*),采用各省份地方财政科学技术支出来衡量;对外贸易(*for*),采用各省份进出口总额来衡量;金融支持(*fin*),采用各省份金融机构本外币贷款余额来衡量;科技成果产出(*tec*),采用各省份技术合同成交额来衡量;经济增长(*gdp*),采用各省份经济增长总量来衡量。

限于篇幅,本文主要变量的描述性统计结果不具体展示。另外,相关性分析结果显示机器人应用水平和产业链创新链融合程度间为正相关关系,机器人应用可促进产业链创新链融合这一结论初步得到验证。

四、实证检验与结果分析

(一) 基准回归结果

基于计量模型式(19)的设定并依据豪斯曼检验结果,本文采用固定效应回归方法结合逐步回归法验证

各变量对产业链创新链融合程度的回归系数的显著性。为了避免回归中可能存在的遗漏变量、异方差和序列相关问题,在估计过程中加入了省份和年份固定效应,估计结果如表4所示。其中,列(1)仅加入了机器人应用水平变量,其回归系数在1%的水平下显著为正,列(2)一列(6)逐步加入了一系列控制变量后,估计结果依然稳健。列(6)为加入了所有控制变量的估计结果,其中机器人应用水平的回归系数显著为正,这说明机器人应用促进了产业链创新链融合。

表4 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>robot</i>	0.1576*** (0.0159)	0.1659*** (0.0153)	0.1445*** (0.0159)	0.1489*** (0.0177)	0.1496*** (0.0177)	0.1579*** (0.0175)
<i>lngov</i>		0.0305*** (0.0051)	0.0394*** (0.0055)	0.0375*** (0.0064)	0.0367*** (0.0066)	0.0459*** (0.0068)
<i>lnfor</i>			-0.0232*** (0.0057)	-0.0234*** (0.0057)	-0.0233*** (0.0057)	-0.0117* (0.0063)
<i>lnfin</i>				0.0101 (0.0176)	0.0083 (0.0178)	0.0315* (0.0184)
<i>ln tec</i>					0.0021 (0.0029)	0.0027 (0.0029)
<i>lngdp</i>						-0.0872*** (0.0218)
截距项	0.2916*** (0.0057)	0.2081*** (0.0151)	0.3541*** (0.0387)	0.2723* (0.1483)	0.2828* (0.1490)	0.7311*** (0.1841)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.7492	0.7708	0.7807	0.7809	0.7812	0.7903
<i>F</i>	69.81	73.80	73.56	69.58	66.05	66.22
样本量	416	416	416	416	416	416

注:括号内数据为稳健标准误;*、**、***分别表示在10%、5%、1%的统计水平上显著。后表同。

(二) 稳健性检验

1. 产业链创新链融合程度的再度量

王淑佳等(2021)认为目前主流的耦合协调度模型所计算出的耦合协调度主要依赖于系统本身的发展程度,系统自身协调水平的作用被弱化,因此提出修正后的耦合协调度模型^[41],即在其他测算公式不变的情况下,将式(28)替换为:

$$C = \sqrt{[1 - (U_1 - U_2)] \frac{U_2}{U_1}}, \max U_i = U_1 \tag{31}$$

本文采用该修正方案对高技术产业的产业链创新链融合程度进行再次测算,并以其作为被解释变量的替代变量,检验基准回归结果的稳健性。表5替换被解释变量的结果表明机器人应用仍然促进产业链创新

链融合。

2. 机器人应用的再度量

参考蒋为等(2022)^[42]的研究,本文对分配至各省份的工业机器人安装量取对数,代替各省份工业机器人安装密度来衡量机器人应用水平,以此作为解释变量的替代变量检验基准回归结果的稳健性。表5替换解释变量的结果表明本文的实证分析结果是稳健的,机器人应用水平的回归系数依然显著为正。

3. 遗漏变量问题

本文在基准回归的基础上,进一步控制了财政自主权、人口老龄化和创新基础设施。其中,财政自主权以地方财政一般公共预算收入和地方财政一般公共预算支出的比值表示,人口老龄化以65岁以上人口占比表示,创新基础设施以电信业务总量占地区生产总值比重表示。表5增加控制变量的结果表明了基准回归结果的稳健性,在进一步控制财政自主权、人口老龄化和创新基础设施后,机器人应用仍然促进产业链创新链融合。

表5 稳健性检验结果

变量	替换被解释变量		替换解释变量		增加控制变量
	未加控制变量	加入控制变量	未加控制变量	加入控制变量	
<i>robot</i>	0.377 6*** (0.047 6)	0.370 5*** (0.056 1)			0.138 1*** (0.018 4)
<i>robot2</i>			0.058 9*** (0.007 4)	0.071 3*** (0.008 0)	
进一步控制	未控制	未控制	未控制	未控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.528 1	0.544 8	0.729 7	0.789 4	0.797 1
<i>F</i>	26.16	21.03	63.11	65.87	59.90
样本量	416	416	416	416	416

(三) 内生性检验

机器人在高技术产业的应用能够推动产业链创新链融合,同时,高技术产业的产业链与创新链深度融合后将会有更高的资金实力和创新需求,从而更加广泛地应用机器人。也就是说,机器人应用和产业链创新链融合程度之间可能存在双向因果关系。因此,本文借鉴王永钦和董雯(2020)^[43]使用美国工业机器人数据重新计算指标进而构造工具变量的做法,以美国行业层面的工业机器人安装量数据为基础重新计算分省份的人均工业机器人安装量,构建工具变量。其合理性在于:一方面,虽然美国应用机器人的时间早于中国,应用水平也更高,但其发展趋势倾向于促进行业技术进步,与中国机器人产业发展走向趋同^[44],以美国行业层面的机器人安装量数据为基础构建机器人应用水平指标,同中国的机器人应用水平具有相关性;另一方面,美国的机器人应用仅反映比较外生的技术进步对中国产业链创新链融合的影响,满足外生性要求。表6的回归结果显示:一阶段工具变量对机器人应用重新估计的回归系数显著为正,二阶段回归中,机器人应用水平的回归系数显著为正,这表明机器人的应用有利于促进产业链创新链融合,与本文的基准回归结

果一致,本文的结论十分稳健。此外,Cragg-Donald Wald F 统计量均在 10%的显著性水平上大于 Stock Yogo 临界值,统计量在 1%的显著性水平上拒绝原假设,表明工具变量通过了不可识别检验与弱工具变量检验。因此,工具变量的选取合理且有效。

表 6 内生性检验结果

变量	一阶段	二阶段
<i>robotTV</i>	5.080 0*** (0.220 2)	
<i>robot</i>		0.174 1** (0.067 3)
控制变量	控制	控制
省份固定效应	控制	控制
时间固定效应	控制	控制
Anderson <i>LM</i>		342.382 0***
Cragg-Donald Wald F		1 716.137 0
样本量	416	416

注:一阶段被解释变量为 *robot*,二阶段被解释变量为 *degree*。

(四) 中介作用机制检验

前文的理论分析中指出机器人应用促进了资本积累和就业极化,进而影响产业链创新链融合。对此,本文分别选取了合适的中介变量,对作用机制进行检验,回归结果如表 7 所示。首先,机器人应用对资本积累的回归系数显著为正,说明机器人应用能够促进资本积累进而促进产业链创新链融合。其次,机器人应用对就业极化的回归系数也显著为正,说明机器人应用能够促进就业极化,而就业极化不利于产业链创新链融合,因此机器人应用所导致的就业极化存在遮掩效应,在一定程度上弱化了机器人应用对产业链创新链融合的促进作用。此估计结果与本文的理论预期相一致,假设 1 和假设 2 得以证明。

表 7 资本积累效应和就业极化效应的作用机制检验

变量	资本积累效应		就业极化效应	
	未加控制变量	加入控制变量	未加控制变量	加入控制变量
<i>robot</i>	2.164 6*** (0.140 5)	0.211 2*** (0.068 2)	6.331 2*** (0.624 5)	3.901 4*** (0.863 5)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.379 0	0.921 4	0.209 0	0.297 1
F	237.37	131.78	102.78	27.05
样本量	416	416	416	416

五、进一步分析

(一) 基于地区划分的异质性分析

由前文可知,高技术产业的产业链创新链融合程度呈现出明显的地区差异,经济发达省份的“双链”融合程度更高,而经济欠发达省份的“双链”融合程度则欠佳。为此,本文进行分地区回归,分别考察东北、东部、中部及西部地区的机器人应用对产业链创新链融合程度的影响。表8的回归结果显示:东部地区、中部地区和西部地区的机器人应用对产业链创新链融合程度的回归系数均显著为正,且西部地区机器人应用的回归系数最大,东部地区机器人应用的回归系数最小;而东北地区机器人应用的回归系数显著为负,说明机器人应用不利于东北地区的产业链创新链融合。上述回归结果通过组间系数差异检验。

分地区回归结果证实了不同地区机器人应用对产业链创新链融合的异质性影响,具体来说,东部地区的经济发展程度较高,市场环境公平有序,生产和投资较为活跃,聚集了实力强、规模大的企业和研发机构。东部地区良好的经济环境和创新生态有利于资本积累效应的发挥,完善的就业政策在一定程度上缓和就业极化效应的不利影响,所以东部地区机器人应用促进产业链创新链融合。随着国家不断优化高等教育资源的布局结构,支持中西部地区扩大高等教育资源规模,中西部地区的就业政策得到完善,因而在创新动能持续激活、就业环境日渐优化的中西部地区,机器人应用也能促进产业链创新链融合。相比之下,东北地区作为老工业基地,产业结构较为单一,不具备经济发展、市场环境、创新生态和就业政策等方面的优势,在应用机器人、引进前沿技术方面起步较晚,资本积累效应难以得到发挥,机器人应用对产业链创新链融合的促进作用较低甚至得不到有效发挥。因此,东北地区的机器人应用无法促进产业链创新链融合的原因可能来源于此。

表8 分地区回归结果

变量	东北地区	东部地区	中部地区	西部地区
<i>robot</i>	-0.418 2** (0.164 0)	0.135 3*** (0.030 5)	0.490 1*** (0.067 8)	0.702 4*** (0.202 2)
控制变量	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.921 4	0.839 3	0.592 4	0.844 1
<i>F</i>	13.39	32.09	63.94	21.65
样本量	48	160	96	112

(二) 基于行业划分的异质性分析

高技术产业内部不同的行业具有不同的要素禀赋特征和发展需求,因此各行业机器人的应用程度及其对产业链创新链融合的影响也是差异化的。基于此,本文根据《中国高技术产业统计年鉴》所公布的细分行业数据,测算了医药制造业、电子及通信设备制造业、计算机及办公设备制造业、医疗仪器设备及仪器仪表制造业的产业链创新链融合程度。由于海南和甘肃的计算机及办公设备制造业数据严重缺失,该

行业的回归分析在原先 26 个省份的基础上进一步删去海南和甘肃的样本,四个细分行业回归结果如表 9 所示。医药制造业、电子及通信设备制造业、计算机及办公设备制造业和医疗仪器设备及仪器仪表制造业的机器人应用回归系数均显著为正。但是不同之处在于,从核心解释变量的系数大小看,医疗仪器设备及仪器仪表制造业的产业链创新链融合所受促进作用似乎要比其他细分行业所受到的促进作用更大。上述回归结果通过组间系数差异检验。

作为高技术产业内部的细分行业,医药制造业、电子及通信设备制造业、计算机及办公设备制造业和医疗仪器设备及仪器仪表制造业均为重视自主研发和技术创新的行业,资本积累效应得到充分发挥。同时,四类行业所生产的产品是数字经济时代居民日常生活所必不可少的产品,机器人应用所带来的收入冲击和消费冲击对这四类行业产品的影响较小,就业极化效应的不利影响也相对较小。因此,机器人应用能提升这四类行业的产业链创新链融合程度。目前国内自主生产的医疗器械产品多为附加值低、科技含量低的常规中低档产品,“高精尖”医疗设备仍然依赖进口,所以在医疗仪器设备及仪器仪表制造业中,机器人能够发挥出更大的促进作用,这也从侧面说明了推动机器人技术向创新不足型行业倾斜的必要性,以机器人应用发掘这类行业的创新潜力。

表 9 分行业回归结果

变量	医药制造业	电子及通信设备制造业	计算机及办公设备制造业	医疗仪器设备及仪器仪表制造业
<i>robot</i>	0.1113*** (0.0253)	0.2445*** (0.0226)	0.0512** (0.0223)	0.3319*** (0.0275)
控制变量	控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.7869	0.6558	0.2781	0.6669
<i>F</i>	64.89	33.48	6.22	35.19
样本量	416	416	384	416

(三) 基于企业规模划分的异质性分析

不同规模企业的机器人应用程度以及创新发展需求存在差异,因此机器人应用对产业链创新链融合的影响在企业规模上存在异质性。据此,本文根据《中国高技术产业统计年鉴》所公布的不同规模的企业数据,分别测算了大型企业和中小企业为主体的产业链创新链融合程度,由于 2009 年之前该年鉴未公布各地区不同规模企业的相关数据,分规模的回归样本中所包含的年份为 2009—2021 年。回归结果如表 10 所示,划分规模后,大型企业和中小企业的机器人应用回归系数均显著为正。上述回归结果通过组间系数差异检验。虽然实力较强的大型企业应用机器人的条件通常更好,但是在产业链的链式结构下,随着企业间的生产分工与要素流动,机器人即使在大型企业中应用更为广泛,其所产生的资本积累效应也能够惠及中小企业。并且,在国家大力支持“补链强链延链”的政策背景下,链主企业积极带动中小企业协同创新,促进中小企业创新发展,中小企业对接创新主体的能力日益提高。由此可见,机器人应用不仅促进了大型企业同创新主体间的创新合作,也有效提升了中小企业同创新主体合作的能力。

表 10 按规模回归结果

变量	大型企业		中小企业	
	未加控制变量	加入控制变量	未加控制变量	加入控制变量
<i>robot</i>	0.157 6*** (0.023 6)	0.196 3*** (0.024 5)	0.137 0*** (0.020 6)	0.169 2*** (0.021 7)
省份固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
拟合优度	0.510 6	0.618 2	0.520 7	0.617 5
<i>F</i>	23.99	26.45	24.99	26.37
样本量	338	338	338	338

注:列(1)、列(3)未加入控制变量,列(2)、列(4)加入控制变量。

六、结论及政策建议

本文基于竞争成功函数和相容利益假设构建产业链创新链互动理论模型,讨论机器人应用对产业链创新链融合的影响,理论分析结果表明机器人应用所产生的资本积累效应促使生产主体同创新主体的创新合作更加活跃,进而促进产业链创新链融合,而机器人应用所产生的就业极化效应则抑制了生产主体同创新主体的创新合作倾向,不利于产业链创新链融合。基于此,本文使用高技术产业相关数据测算产业链创新链融合度指标,并结合中国 2006—2021 年省级面板数据,构建计量模型实证检验机器人应用对产业链创新链融合的影响。主要结论包括:(1)机器人应用能够促进产业链创新链融合,这一研究结论经稳健性检验和内生性检验后依然成立。(2)资本积累效应和就业极化效应是机器人应用影响产业链创新链融合的主要作用机制,资本积累在机器人应用促进产业链创新链融合中发挥了中介效应,就业极化则表现为遮掩效应。(3)基于地区、行业和企业层面的异质性分析结果表明,东部、中部和西部地区积极应用机器人,就业政策完善,机器人应用促进这些地区的产业链创新链融合,机器人应用起步较晚的东北地区则未受到机器人应用对产业链创新链融合的促进作用;在重视自主研发和技术创新的高技术产业细分行业中,机器人应用均能促进产业链创新链融合,其中产品附加值低、科技含量不足的医疗仪器设备及仪器仪表制造业所受到的促进作用相对较大;另外,机器人应用对以不同规模企业为主体的产业链创新链融合均存在促进作用。据此,本文认为应着重从以下三方面构建机器人应用背景下产业链创新链的融合体系:

第一,加速智能制造发展,提高机器人解决产业发展实际问题的能力。机器人应用的促进作用将成为产业链创新链融合的持续动力,但国内产业使用的机器人多数来源国外,这成为加快实现智能制造的掣肘因素。因此,建议持续推进机器人广泛应用进程,一要补齐机器人生产研发的短板技术,在产品研发、生产制造和推广应用各环节加强合作,定位机器人产业链的“痛点阻点”,补齐技术短板,克服发展壁垒,夯实机器人应用支持产业创新发展的基础;二要在机器人生产研发中融入新兴技术,推动机器人技术与数字通信、新能源、新材料和网络安全等新兴技术的融合发展,增强机器人的智能控制力和精准操作力,适应产品多样

化和场景差异化需求,使其切实推动产业发展快速迈向智能化阶段。

第二,持续完善就业政策,应对机器人冲击所导致的劳动力失业问题。本文对资本积累效应和就业极化效应的分析发现,机器人应用促使产业内资本迅速扩张,而低技能劳动力持续被挤出,由此导致的劳动力失业问题不利于产业链创新链融合。为此,政府一方面应在低技能劳动力技能培训方面投入更多资金支持,提高低技能劳动力的技能水平,使其适应产业发展的智能化和自动化转变;另一方面,政府应提高公共投入,为失业劳动力提供岗位,并以财政补贴和税收优惠的方式,鼓励经营主体增设低技能就业岗位,以此缓冲机器人冲击所导致的“下岗潮”,在获得机器人应用红利的同时,尽量避免机器人冲击对产业链创新链融合的不利影响。

第三,合理规划行业布局,因势利导地营造健康良好的产业发展环境。本文的异质性研究表明,机器人应用对产业链创新链融合的影响表现出明显的地区、行业和企业异质性,政府部门应着重对机器人应用落后地区、创新动力不足的行业给予鼓励和支持,并持续发挥产业链协同创新效应,强化产业链内大企业對中小企业的创新带动作用。其一,对于技术基础薄弱的地区,应给予机器人企业招商引资方面的政策优惠,并结合地区产业发展实际,满足当地智能制造需求,大力促进地区间的技术转移。其二,以机器人应用激发弱势行业的创新潜力,实现机器人技术及相关人才在不同行业间的合理分配,逐步实现机器人在全行业的广泛应用,并保障所有行业的技术升级平稳有序地进行。其三,定向引导机器人应用向中小企业倾斜,针对中小企业给予价格补贴,鼓励和引导中小企业优化制造工艺和生产体系,在政策鼓励和链主企业带动的双重支持下,提升中小企业的自主创新能力,实现中小企业对大企业乃至整条产业链的创新“反哺”,切实提升产业链韧性。针对性实施差异化政策,方能最大化发挥机器人应用对产业链创新链的促进作用。

参考文献:

- [1] 孙琴,刘戒骄,胡贝贝. 中国集成电路产业链与创新链融合发展研究[J]. 科学学研究,2023,41(7):1223-1233.
- [2] 傅国华. 运转农产品产业链 提高农业系统效益[J]. 中国农垦经济,1996(11):24-25.
- [3] 简新华. 产业经济学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
- [4] 杨公朴,夏大慰. 现代产业经济学[M]. 2版. 上海:上海财经大学出版社,2005.
- [5] BLAUG M. Is competition such a good thing? Static efficiency versus dynamic efficiency[J]. Review of Industrial Organization, 2001, 19(1): 37-48.
- [6] 吴金明,邵昶. 产业链形成机制研究——“4+4+4”模型[J]. 中国工业经济,2006(4):36-43.
- [7] 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]. 中国软科学,2018(5):39-48.
- [8] 李雪松,龚晓倩. 地区产业链、创新链的协同发展与全要素生产率[J]. 经济问题探索,2021(11):30-44.
- [9] 林森,苏竣,张雅娴,等. 技术链、产业链和技术创新链:理论分析与政策含义[J]. 科学学研究,2001(4):28-31.
- [10] 代明,梁意敏,戴毅. 创新链解构研究[J]. 科技进步与对策,2009,26(3):157-160.
- [11] 杨忠,李嘉,巫强. 创新链研究:内涵、效应及方向[J]. 南京大学学报(哲学·人文科学·社会科学),2019,56(5):62-70.
- [12] 高洪玮. 推动产业链创新链融合发展:理论内涵、现实进展与对策建议[J]. 当代经济管理,2022,44(5):73-80.
- [13] FRITSCH M, SLAVTCHEV V. Universities and innovation in space[J]. Industry and Innovation, 2007, 14(2): 201-218.

- [14] POWERS J B, MCDUGALL P P. University start-up formation and technology licensing with firms that go public: a resource-based view of academic entrepreneurship[J]. *Journal of Business Venturing*, 2005, 20(3): 291-311.
- [15] 韩江波. 创新链与产业链融合研究——基于理论逻辑及其机制设计[J]. *技术经济与管理研究*, 2017(12): 32-36.
- [16] 洪银兴. 围绕产业链部署创新链——论科技创新与产业创新的深度融合[J]. *经济理论与经济管理*, 2019(8): 4-10.
- [17] 梁树广, 张芑芑, 臧文嘉. 制造业创新链产业链资金链的耦合协调度与耦合路径研究[J]. *调研世界*, 2023(1): 53-60.
- [18] 陈彦斌, 林晨, 陈小亮. 人工智能、老龄化与经济增长[J]. *经济研究*, 2019, 54(7): 47-63.
- [19] 王林辉, 袁礼. 有偏型技术进步、产业结构变迁和中国要素收入分配格局[J]. *经济研究*, 2018, 53(11): 115-131.
- [20] 叶光亮, 程龙, 张晖. 竞争政策强化及产业政策转型影响市场效率的机理研究——兼论有效市场与有为政府[J]. *中国工业经济*, 2022(1): 74-92.
- [21] BUCHANAN J, TULLOCK G, TOLLISON R. *Toward a theory of the rent-seeking society*[M]. College Station, TX: Texas A&M University Press, 1980.
- [22] SKAPERDAS S. Contest success functions[J]. *Economic Theory*, 1996, 7(2): 283-290.
- [23] CLARK D J, RIIS C. Contest success functions: an extension[J]. *Economic Theory*, 1998, 11(1): 201-204.
- [24] 杨武, 王玲. 技术创新溢出的乘数效应与加速效应研究[J]. *科学学研究*, 2005(3): 425-427.
- [25] 皮建才. 中国式分权下的地方官员治理研究[J]. *经济研究*, 2012, 47(10): 14-26.
- [26] ACEMOGLU D, RESTREPO P. The race between man and machine: implications of technology for growth, factor shares, and employment[J]. *American Economic Review*, 2018, 108(6): 1488-1542.
- [27] BORJAS G J, FREEMAN R B. From immigrants to robots: the changing locus of substitutes for workers [Z]. NBER Working Paper No. 25438, 2019.
- [28] 陈楠, 蔡跃洲. 人工智能技术创新与区域经济协调发展——基于专利数据的技术发展状况及区域影响分析[J]. *经济与管理研究*, 2023, 44(3): 16-40.
- [29] 钟文, 郑明贵. 异质性实物资本积累对产业创新的影响研究[J]. *闽江学刊*, 2020, 12(5): 71-78.
- [30] 尹翔硕, 尹翔康. 资本积累、模仿与创新——从美国和日本的经济发展前景看落后国家如何赶超[J]. *复旦学报(社会科学版)*, 2001(4): 87-95.
- [31] 赵甜, 方慧. OFDI与中国创新效率的实证研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2019, 36(10): 58-76.
- [32] 郝楠. 劳动力就业“极化”、技能溢价与技术创新[J]. *经济学家*, 2017(8): 27-32.
- [33] 宋建, 王静. 中国企业创新、就业动态与工业生产率提升[J]. *中国人民大学学报*, 2022, 36(5): 106-120.
- [34] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. *中国工业经济*, 2022(5): 100-120.
- [35] 邢玉冠, 杨道玲. 基于“动力—状态—响应”模型的京津冀产业创新能力评价[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(14): 33-42.
- [36] 王荣. 基于要素视角的产业链与创新链耦合发展研究[J]. *管理现代化*, 2021, 41(6): 12-14.
- [37] 杨亚平, 周泳宏. 成本上升、产业转移与结构升级——基于全国大中城市的实证研究[J]. *中国工业经济*, 2013(7): 147-159.
- [38] 洪银兴. 科技创新阶段及其创新价值链分析[J]. *经济学家*, 2017(4): 5-12.
- [39] 张鹏岩, 杨丹, 李二玲, 等. 人口城镇化与土地城镇化的耦合协调关系——以中原经济区为例[J]. *经济地理*, 2017, 37(8): 145-154.
- [40] 陈媛媛, 张竞, 周亚虹. 工业机器人与劳动力的空间配置[J]. *经济研究*, 2022, 57(1): 172-188.
- [41] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 793-810.
- [42] 蒋为, 龚思豪, 李锡涛. 机器人冲击、资本体现式技术进步与制造业碳减排——理论分析及中国的经验证据[J]. *中国工业经济*, 2022(10): 24-42.
- [43] 王永钦, 董雯. 机器人的兴起如何影响中国劳动力市场? ——来自制造业上市公司的证据[J]. *经济研究*, 2020, 55(10): 159-175.
- [44] 倪静洁, 郭檬楠. 工业机器人应用如何影响企业内部控制质量? [J]. *经济与管理研究*, 2023, 44(6): 19-37.

Impact of Robot Applications on the Fusion of Industrial Chain and Innovation Chain

ZHANG Benxiu, WU Fuxiang
(Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: As the core technology of the new round of scientific and technological revolution, robots are an important driving force for the fusion of industrial chain and innovation chain (hereinafter referred to as the two chains). A correct understanding of the influence of robot applications on industrial innovation and development and good coordination between production and innovation subjects can promote the fusion and stabilize the driving force of high-quality development.

This paper constructs an interactive theoretical model of the two chains based on the contest success function and the assumption of encompassing interests and discusses the influence of robot applications on the fusion of the two chains. The theoretical analysis results show that capital accumulation plays a mediating effect in robot applications promoting the fusion, while employment polarization exerts a masking effect. Then, this paper uses relevant data from high-tech industries to measure the fusion index of the two chains and combines them with provincial panel data of China from 2006 to 2021 to build an econometric model to empirically test the impact of robot applications on the fusion.

The results are as follows. (1) Robot applications significantly promote the fusion of the two chains, and this conclusion remains valid after the robustness and endogeneity tests. (2) The capital accumulation effect and the employment polarization effect are the main mechanisms of robot applications affecting the fusion of the two chains, with the former playing a mediating effect and the latter exerting a masking effect. (3) The heterogeneity analyses show that the eastern, central, and western regions actively apply robots and improve employment policies, where robot applications significantly promote the fusion of the two chains. However, this promoting effect is insignificant in the northeastern region where robot applications started relatively late. In high-tech industry segments that value independent research and technological innovation, robot applications can significantly promote the fusion of the two chains. Among them, the medical equipment and instrument manufacturing industry with low-added value products and insufficient technological content gains much more benefit. In addition, the promoting effect prevails in enterprises of different scales.

The findings reveal the mechanism and heterogeneity of robot applications on the fusion of the two chains, which can provide some empirical support and policy basis for optimizing the industrial innovation development environment. Therefore, this paper proposes to improve the ability of robots to solve practical problems in industrial development, properly deal with the adverse impact caused by robot impact, face up to the development gap between regions, industries, as well as enterprises, create a healthy environment for industrial development, and maximize the role of robot application in promoting the fusion of the two chains.

Keywords: robot application; industrial chain; innovation chain; capital accumulation; employment polarization

责任编辑:姜 莱