

工业机器人应用与OFDI模式下的对外产业转移

——兼论缓解产业链“二元悖论”的冲击

綦建红, 张志彤, 赵伟康

[摘要] 维护产业链安全稳定是构建新发展格局的基础。面对日益攀升的对外产业转移压力,中国有必要从新一轮科技革命和产业变革中寻求应对方略及全球经验。本文在理论分析的基础上,采用121个母国和186个东道国的国别—行业数据,实证考察工业机器人应用对产业转移的影响和作用渠道,并进一步讨论工业机器人应用对产业链“二元悖论”的影响。研究发现,工业机器人应用显著抑制了对外产业转移。究其作用机制,工业机器人应用的对外产业转移抑制作用既源于降低相对工资、增加出口替代、加剧利益博弈等拉力渠道,也源于提升相对产能和增加行业竞争等推力渠道,且数值模拟的结果表明,拉力作用明显高于推力作用,拉力渠道中相对工资渠道占据主导作用。进一步分析发现,工业机器人应用在抑制对外产业转移的同时,有助于提高产业影响力,降低产业脆弱性,可以在一定程度上缓解产业链“二元悖论”的冲击,这再次彰显了工业机器人应用对于维护产业链安全稳定、构建新发展格局的重要意义。

[关键词] 机器人应用; 对外产业转移; 推力渠道; 拉力渠道; “二元悖论”

[中图分类号] F424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2024)06-0061-19

一、引言

中央经济工作会议多次强调产业链供应链安全稳定是构建新发展格局的基础,这既是中国稳经济、提韧性和经济高质量发展的重要内容,也是国家经济安全的重要组成部分。然而,近年来中国对外产业转移的双重压力不断攀升。一方面,随着人口红利消失和劳动力成本上升,中国低端产业逐渐向东南亚、印度和墨西哥等劳动力丰裕国家转移;另一方面,美、欧、日等国家和地区不断实施产业链“去中国化”,高端产业出现了向发达国家“回流”的现象。一旦对外产业转移的规模过大、速度过快,就会对经济运行产生一系列负面影响,如企业搬离、就业流失、税收下降(Kovak et al., 2021),甚至危及中国产业链的完整性、可控性和安全性(徐奇渊等,2022)。如何有效应对不断攀升的对外产业转移压力、保障产业链安全稳定,已成为中国一项重大的战略任务。为了同各国一道构

[收稿日期] 2024-01-20

[基金项目] 国家自然科学基金重大项目“数字经济反垄断理论与政策研究”(批准号72192842);国家社会科学基金重点项目“平台竞争策略对企业创新的影响及规则边界研究”(批准号23AJY006)。

[作者简介] 綦建红,山东大学经济学院教授,山东大学国家治理研究院研究员,博士生导师,经济学博士;张志彤,山东大学经济学院博士研究生;赵伟康,山东大学经济学院博士研究生。通讯作者:张志彤,电子邮箱:angeliazhang99@163.com。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,当然文责自负。

建安全稳定的产业链,中国有必要从新一轮科技革命和产业变革中寻求应对方略与各国经验。围绕这样一个新视角,本文思考的第一个问题是,以工业机器人(简称机器人)为代表的人工智能技术能否成为抑制对外产业转移的新生力量。

一方面,对外产业转移的动因包括国内劳动力、土地等生产要素的长期变化,也包括国际间大国博弈的利益驱动。在生产要素方面,以最低工资制度实施为代表的劳动力成本上涨是对外产业转移的重要影响因素之一(Fan et al., 2018)。而机器人可以在更大范围、更大程度上实现技术红利对人口红利的替代(陈彦斌等, 2019),缓解人口老龄化加深和劳动力成本攀升的不利影响。但是,机器人应用也增加了对高技能劳动力的雇佣,导致工资存在上升压力。从生产要素看,对于应用机器人之后产业是“去”还是“留”,理论与现实之间存在巨大的不确定性。在利益博弈方面,地缘政治和贸易摩擦等同样给国际分工和对外产业转移带来了巨大的不确定性(崔晓敏等, 2022),而机器人应用有可能改变发展中国家和发达国家二元对立下的失衡格局,导致各国利益变动,并朝着更有利于发展中国家的方向重构(黄亮雄等, 2023)。这种重构过程揭示了新的矛盾和冲突。机器人应用会使发展中国家在技术层面获得一定优势,从而在国际分工中争取更有利的地位;与此同时,政治和经济摩擦却不断威胁这些国家产业链的稳定性,导致机器人应用影响对外产业转移的方向存在不确定性。因此,基于上述理论与现实的冲突,本文旨在通过分析机器人的相对工资和利益博弈等渠道,研究机器人影响对外产业转移的作用机制。

另一方面,机器人应用对价值链分工位置与体系产生了重要影响,而全球分工变革是产业转移的前提条件,价值链是产业转移的必然结果,因此,机器人应用对产业转移的影响不容小觑。机器人应用通过降低生产成本和提升生产率,可以提高各国参与全球价值链的分工程度(吕越等, 2020; 刘斌和潘彤, 2020)。然而,这一过程同样伴随着复杂的理论和现实冲突。根据现有理论,价值链重构分为垂直和水平两种方式,前者体现为上下游中间层级的减少,后者则体现为某一特定层级中供应商数量的减少(黄亮雄等, 2023)。其中,当价值链比较优势的形成因素发生变化并导致产品生产向其他地理位置转移时,这种产业转移即为水平重构。然而,从美国、墨西哥等国的现实看,机器人应用会产生两种截然不同的结果:一种结果是机器人应用减少了从主要供应商购买的中间投入,增加了离岸外包业务,且机器人应用密度越高,外包业务越多(Cilekoglu et al., 2024);另一种结果则是机器人应用通过降低母国相对生产成本和提高母国劳动生产率,降低了发达国家的海外建厂动机,减少了离岸外包,促进了外包回流(Krenz et al., 2021)。上述两种相互矛盾的结果揭示了机器人应用在全球价值链重构中的复杂性和冲突性,因此,有必要将水平重构纳入分析框架,进一步解释机器人应用对全球价值链重构的影响。

本文思考的第二个问题是,机器人应用在影响对外产业转移的同时,能否在一定程度上缓解产业链“二元悖论”的冲击。“二元悖论”理论最早应用于国际金融领域,近年来被引入产业组织领域,用以反映产业竞争力与脆弱性之间的相悖关系。例如, Gasiorek et al. (2019) 聚焦英国,发现外部冲击对英国高技术和中高技术行业等影响力较高行业的脆弱性产生了更为显著的负面冲击; Sharma et al. (2023) 聚焦印度,也发现影响力越大的行业供应链环节越复杂、链条越长,供应链脆弱性越强,内部可控性越差。徐奇渊等(2022)、崔晓敏等(2022)从全球视野出发,同样发现一国在某个产业链上具有较强的国际竞争力和具有完全自主可控性之间难以同时实现,存在“二元悖论”。已有文献发现,产业链“二元悖论”之所以存在,是因为全球产业链分工以产品内分工为主要特征,各国根据产业的不同环节选择专业化生产(何宇等, 2021)。在这种分工模式下,各国的要素禀赋优势得以充分发挥,且全球生产网络的参与程度越深,产业竞争力越强。然而,近几年的现实情形一再表明,产

业链上任意国家的供给出现问题,其他国家相关产业都将出现“断链”风险(吕越等,2024),即一国产业链在获得竞争力的同时,其对产业链的自主控制力往往较差,面临的脆弱性风险较大(崔晓敏等,2022)。对此,本文需要进一步考察机器人应用在影响对外产业转移的同时如何影响产业链影响力和脆弱性,这个答案对于构建新发展格局、兼顾产业链效率与安全至关重要。

本文旨在考察机器人应用对产业转移的影响和作用渠道,并进一步讨论其对产业链“二元悖论”的影响。本文可能的边际贡献在于:理论层面,尝试厘清机器人应用影响对外产业转移的作用渠道,发现机器人应用对产业转移的影响同时具备“拉力”和“推力”作用,并通过数值模拟和反事实的方式对比两种力量孰强孰弱;还进一步考察其对产业链影响力和脆弱性的影响,重新反思人工智能时代产业链“二元悖论”所面临的冲击。政策层面,为人工智能与对外产业转移之间的关系提供更具普适性和应用性结论的同时,有助于引导中国更加合理地调整和优化产业政策,积极实施“人工智能+”行动方案,为应对产业链风险和提高产业链韧性提供重要的参考依据。

二、理论模型

在已有文献中,仅有 Hallward-Driemeier and Nayyar(2019)从实证层面考察了机器人使用对国际直接投资的影响,而结构化理论分析的缺失导致其并未深刻揭示机器人应用对产业转移的内在机制。本文在 Krenz et al.(2021)模型的基础上,通过比较不同生产状态下的利润水平,推导对外产业转移的变化,为后文实证考察机器人应用对产业转移的影响及其作用机制奠定理论基础。

1. 基本假设

假设母国(H)存在一个生产最终产品的代表性企业,该企业在母国进行组装或者在东道国(F)分销组装。代表性企业通过使用高技能劳动力和差异化中间品完成最终产品的生产,其他企业则负责生产中间品。当这些企业选择对外产业转移时,不同企业的生产活动将分布到世界各国。本文首先关注垂直型投资模式,然后在机制分析中考虑水平型投资模式^①。

假设最终产品的生产由少数高技能工人和一系列中间品组成,生产中间品的企业可以在东道国使用低技能劳动力生产,也可以在母国使用机器人生产。令 q 代表企业使用机器人生产后的效率,企业应用机器人的数量越多,其机器人生产效率就越高。令 $y(q)$ 表示中间品投入数量,并采用柯布一道格拉斯形式,那么最终产品的生产函数 Y 由下式给出:

$$Y = l_{H,H}^{1-\varepsilon} \int_0^{Q+1} y(q)^\varepsilon dq \quad (1)$$

其中, $l_{H,H}$ 为母国高技能劳动力的投入; $\varepsilon \in (0, 1)$ 是高技能劳动力相对于中间品投入的弹性。积分下界 Q 和积分上界 $Q+1$ 分别代表生产率最低和最高企业使用机器人后的生产效率,假设 q 在区间 $[Q, Q+1]$ 上服从均匀分布。当 Q 增大时,所有企业的机器人生产效率均会上升。由式(1)可推出中间品价格 P 的决定式:

$$P = \varepsilon l_{H,H}^{1-\varepsilon} y^{\varepsilon-1} \quad (2)$$

每种中间品都由一家差异化企业进行生产。在初始条件下,企业存在母国生产和东道国生产两种情况。当企业选择在东道国生产时,其生产函数可表示为:

$$y_F = l_F^\alpha \quad (3)$$

^① 投资模式并不改变本文的主要结果,只影响母国机器人应用和东道国生产的临界生产率。

其中, l_f 表示东道国的低技能劳动力投入数量; $\alpha \in (0, 1)$ 是产出相对于低技能劳动力的投入弹性。当企业选择在母国生产时, 可雇用劳动力或应用机器人进行生产, 其生产函数为:

$$y_{H,A} = (qbA)^\alpha, y_{H,L} = l_{H,L}^\alpha \quad (4)$$

其中, $l_{H,L}$ 表示母国的低技能劳动力投入数量, A 表示企业使用的机器人资本, b 为单位机器人对单位劳动投入的弹性系数。本文假设机器人价格 r 是外生的, 此时企业在母国生产和在东道国生产的利润函数如下所示:

$$\pi_{H,A} = Py_{H,A} - rA, \pi_{H,L} = Py_{H,L} - w_{H,L}l_{H,L}, \pi_F = \frac{Py_F}{\sigma} - w_Fl_F \quad (5)$$

其中, $w_{H,L}$ 和 w_F 分别是母国和东道国低技能劳动力的工资水平。假设企业在东道国仅雇用劳动力进行生产, 并将产品运回母国, 承担总成本为 σ 的关税和其他贸易成本, 其中, $\sigma \geq 1$ 。

2. 模型求解^①

在母国生产时, 企业可以选择雇佣劳动力或使用机器人实现利润最大化; 在东道国生产时, 企业只能通过雇佣劳动力实现利润最大化。通过比较 $\pi_{H,A}$ 和 π_F , 以及 $\pi_{H,L}$ 和 π_F , 可以得到母国机器人生产和对外产业转移的临界生产率、母国雇佣劳动力生产与东道国生产均衡的临界条件。假设母国雇佣劳动力生产与东道国生产均衡的临界条件服从 $[\underline{x}, \bar{x}]$ 均匀分布, 可以计算出企业选择在母国使用机器人生产、东道国生产和在母国雇佣劳动力生产的份额:

$$\begin{aligned} \theta_{H,A} &= \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \int_{\underline{x}}^{w_{H,L}} (Q + 1 - \frac{r}{bx}) dx + \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \int_{w_{H,L}}^{\bar{x}} (Q + 1 - \frac{r}{bw_{H,L}}) dx \\ &= \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \left[(Q + 1)(w_{H,L} - \underline{x}) - \frac{r}{b} (\ln w_{H,L} - \ln \underline{x}) + (\bar{x} - w_{H,L})(Q + 1 - \frac{r}{bw_{H,L}}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta_F = \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \int_{\underline{x}}^{w_{H,L}} (\frac{r}{bx} - Q) dx = \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \left[(\frac{r}{b} \ln w_{H,L} - Qw_{H,L}) - (\frac{r}{b} \ln \underline{x} - Q\underline{x}) \right] \quad (7)$$

$$\theta_{H,L} = \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \int_{w_{H,L}}^{\bar{x}} (\frac{r}{bw_{H,L}} - Q) dx = \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} (\bar{x} - w_{H,L})(\frac{r}{bw_{H,L}} - Q) \quad (8)$$

3. 作用机制

(1) 相对工资渠道。在母国, 低技能工资 $w_{H,L}$ 由母国劳动力市场均衡状况确定, 劳动力需求降低引起的工资变动会导致产业转移份额发生变化, 即:

$$\frac{\partial \theta_F}{\partial w_{H,L}} = \frac{1}{\bar{x} - \underline{x}} \left(\frac{r}{bw_{H,L}} - Q \right) > 0 \quad (9)$$

由上式可知, 工资与产业转移份额变动存在正相关关系, 对于仅雇佣劳动力的企业而言, $w_{H,L}$ 的下降使母国成本降低, 说明机器人应用降低了母国与东道国劳动力的相对工资, 导致部分低生产率企业在母国生产的利润逐渐高于东道国, 最终减少了对外产业转移。

(2) 出口替代渠道。劳动力替代效应主要存在于制造业垂直型投资中, 这种模式主要源于母国与东道国的劳动力成本差异。同时, 贸易成本也是产业转移的重要考虑因素, 企业为了降低贸易成本, 可能选择在其他国家进行水平型投资, 通过将生产线复制到东道国, 在东道国完成组装分销。此时, 母国机器人生产和对外产业转移的临界生产率为:

$$\bar{q}_2 = \frac{r\sigma^{\frac{1}{\alpha\sigma}}}{w_F} \quad (10)$$

^① 详细的模型推导过程参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

相较于垂直型投资,水平型投资的机器人应用生产率临界值更高。母国企业应用机器人可以通过提高企业生产率,使企业的产出利得超过贸易成本损失,出口利润最终高于海外投资收益,产业转移相应减少。

(3)利益博弈渠道。机器人应用可能会重塑发展中国家与发达国家之间产业链价值链的失衡状态,重构各国利益格局,加剧经济竞争和政治博弈,并导致行业投资壁垒提高。换言之,东道国为保护本地企业发展,可能制约甚至是制裁机器人发展迅速国家的企业,导致母国对外产业转移风险提高。假定母国使用机器人生产导致产业转移面临的风险系数为 μ ,那么由东道国生产的利润期望函数和临界生产率可以求得:

$$\frac{\partial \theta_{F,3}}{\partial \mu} = \frac{1}{\alpha \varepsilon} \frac{r}{b} (1 - \mu)^{\frac{1}{\alpha \varepsilon} - 1} (\ln \underline{x} - \ln w_{H,L}) < 0 \quad (11)$$

随着风险 μ 增加,机器人应用加剧了产业转移至某些利益博弈国家的风险,提高了离岸门槛,不仅会减少对外产业转移,甚至会促使部分产业回流。

(4)相对产能渠道。随着机器人应用对生产率的提升,从事中间品生产的企业逐渐使用机器人替代母国劳动力生产和东道国生产,引起最终品产量的变化。由最终品的产出对 Q 求导得到:

$$\frac{\partial Y}{\partial Q} = l_{H,H}^{1-\varepsilon} \frac{1}{x - \underline{x}} \left(\underbrace{\frac{\partial Y_{H,A1}}{\partial Q} + \frac{\partial Y_F}{\partial Q}}_{S_1 \text{ 东道国生产与母国机器人应用生产}} + \underbrace{\frac{\partial Y_{H,A2}}{\partial Q} + \frac{\partial Y_{H,L}}{\partial Q}}_{S_2 \text{ 母国劳动力与母国机器人应用生产}} \right) > 0 \quad (12)$$

这意味着机器人应用提高了总产出。然而,当产能高于母国市场的最大需求时,就会出现产能过剩,此时只要东道国市场存在产出缺口和盈利空间,高生产率企业便会将过剩产能转移至东道国生产,促进了对外产业转移。

(5)市场竞争渠道。机器人应用加快了新企业进入,减少了原有企业退出(李磊等,2023),导致同一行业内同质产品的生产企业增加,加剧了行业“侵蚀性竞争”。假设行业竞争对母国企业利润函数的影响系数为 δ ,通过利润函数可以得到对外产业转移份额:

$$\theta_{F,4} = \frac{1}{x - \underline{x}} \left[\left(\frac{r}{b(1-\delta)^{\frac{1}{\alpha \varepsilon}}} \ln w_{H,L} - Q w_{H,L} \right) - \left(\frac{r}{b(1-\delta)^{\frac{1}{\alpha \varepsilon}}} \ln \underline{x} - Q \underline{x} \right) \right] \quad (13)$$

行业竞争 δ 加剧时,不仅单个企业的母国利润相对于东道国利润降低,而且在母国使用机器人生产与东道国生产的生产率门槛也逐渐提高,促使部分低生产率企业不得不寻求工资成本更低的东道国进行生产。

三、实证设计

为了验证前文理论推导,并为后文实证建模提供数据支撑,本文采用121个母国和186个东道国的国别—行业数据,提供机器人应用和对外产业转移的特征事实,为定量评估机器人应用对产业转移的影响奠定数据基础。

1.数据来源

本文参照Acemoglu and Restrepo(2020)、陈东和秦子洋(2022)的做法,采用机器人安装量作为衡量机器人应用的重要指标,数据来源于国际机器人联合会(IFR)。IFR提供了1993年以来机器人的安装数据,覆盖多个国家和地区的多个行业类别,为跨国跨行业的研究提供了良好的数据基础。

在对外产业转移方面,本文选择的数据来源如下:一是 fDi Markets 绿地投资数据库,该数据库是目前最全面的跨境绿地投资数据库;二是 Zephyr 并购交易数据库,该数据库目前收录了全球各行业 160 万笔并购记录。本文按照母国—东道国—行业—时间层面加总,并做如下处理:①由于 fDi Markets 数据库和 Zephyr 数据库所采用的行业代码不完全一致,本文根据行业释义将其统一为 IFR 数据所使用的行业代码,共包括 21 个行业,并按照母国—东道国—行业—时间维度进行企业数据加总。②按照行业代码、母国名称、东道国名称、年份对上述三个数据库进行横向合并匹配。其中,对于各国各行业的绿地投资和跨国并购数据,按照年度汇率折算后,可加总得到本文所需的对外直接投资(OFDI)数据。③由于本文使用的是母国—东道国—行业—年份层面的数据,为减少遗漏变量偏误,加入母国—东道国—行业—年份和东道国—年份层面的控制变量,数据分别来自世界投入产出数据库(WIOD)、世界银行数据库和 CEPII 数据库等。由于各数据库的时间跨度不一致,且 WIOD 数据库仅更新至 2014 年,本文取各数据库的交集,选定 2003—2014 年作为本文的样本区间,并最终得到 121 个母国、186 个东道国、21 个行业的数据,共计 27865 个观测值。需要说明的是,CEPII 数据库中涵盖的国家与 IFR 数据库有所出入,故存在部分国家未能匹配,导致母国—东道国控制变量的观测值为 26549。同时,被解释变量需要跨期处理,核心解释变量和控制变量均需要滞后一期处理,导致样本量有所损失,基准回归的最终样本量为 24385 个观测值。

2. 核心变量

在被解释变量方面,囿于产业转移的复杂性和相关数据缺失,目前尚未形成一致的定义和衡量方法,寻找对外产业转移的代理变量是本文亟须解决的一大难题。产业转移主要表现为产业活动在区域间的分布变化,一般通过比较地区间产业经济指标的此消彼长来说明产业转移的方向和程度(孙晓华等,2018)。其中,在国际分工领域,Hallward-Driemeier and Nayyar(2019)将国际直接投资纳入对外产业转移框架,使用绿地投资数据来反映对外产业转移。上述做法的合理性在于:一方面,与贸易等具有粘性的变量不同,国际直接投资具有前瞻性,跟随其他因素的变化也较为缓慢(Hallward-Driemeier and Nayyar,2019);另一方面,对外产业转移实际上与跨国公司布局密切相关,OFDI 逐渐成为跨国公司进入全球产业链的最重要方式(徐奇渊等,2022)。由于对外产业转移主要体现为行业增加值的变化,本文参考上述代表性文献,选用行业 OFDI 数据作为行业增加值的代理变量;同时,为了刻画对外产业转移的全貌,本文构建的对外产业转移指标包含相对指标和空间指标两个方面。

相对指标借鉴戴翔等(2016)的做法,构建基于 OFDI 的区位熵指数(LQ),并将区位熵指数跨期差分,可得到对外产业转移变化量(CLQ),即:

$$LQ_{jkt}^i = \frac{ofdi_{jkt}^i / \sum_{i=1}^n ofdi_{jkt}^i}{\sum_{k=1}^m ofdi_{jkt}^i / \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m ofdi_{jkt}^i}, (i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (14)$$

$$CLQ_{jkt}^i = LQ_{jkt}^i - LQ_{jkt-1}^i \quad (15)$$

其中, $ofdi_{jkt}^i$ 表示 i 国 k 行业在 t 年对 j 国的 OFDI 流量, CLQ_{jkt}^i 表示区位熵的变化量, $CLQ_{jkt}^i > 0$ 表示存在由 j 国向 i 国 k 行业的 OFDI 聚集,反之表示存在 OFDI 转移。

空间指标借鉴熊雪如(2015)的做法,首先运用修正后的引力模型计算两国间的经济联系强度,将其作为国家间经济关联度大小的指标(R),然后将经济关联度作为权重,使产业转移相对指标按照国家经济关联度的大小分配至转入或转出的各个国家。国家间经济关联度表达式为:

$$R_{ij} = \sqrt{\frac{p_u p_j g d p_u g d p_j}{d_{ij}}} \quad (16)$$

其中, p 代表某国的人口规模; gdp 代表某国国内生产总值; d_{ij} 代表 i 国与 j 国首都之间的距离, 具有空间性质。

将国家间经济关联度作为对外产业转移相对指标的权重, 以某国就业人数占比作为修正指数, 由此可得对外产业转移的空间指标, 即对外产业转移相对净流量 (TS):

$$TS_{jkt}^i = CLQ_{jkt}^i \times \frac{R_{jt}}{\sum_{i=1}^n R_{jt}} \times \frac{Emp_{it}}{\sum_i Emp_{it}} - CLQ_{ikt}^j \times \frac{R_{jt}}{\sum_{j=1}^n R_{jt}} \times \frac{Emp_{jt}}{\sum_j Emp_{jt}} \quad (17)$$

在核心解释变量方面, 参照 Acemoglu and Restrepo (2020) 的做法, 使用各国各行业的机器人安装情况来表征机器人应用情况。其中, 基准模型采用上一期机器人安装存量的对数值 ($Robot$) 衡量, 稳健性检验中则使用机器人安装流量和安装密度指标来替代, 以保证结论的可信性。考虑到机器人的经济效应并非立竿见影, 本文将核心解释变量和控制变量做滞后一期处理。

3. 模型设定

为了检验机器人应用对各国不同行业对外产业转移的影响, 借鉴刘斌和潘彤 (2020)、吕越等 (2024) 的做法, 设定基准模型如下:

$$CLQ(TS)_{ijkt} = \alpha_0 + \alpha_1 Robot_{ikt-1} + \alpha Controls + \delta_i + \tau_j + \pi_k + \varphi_t + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijkt} \quad (18)$$

其中, i 代表母国, j 代表东道国, k 代表行业, t 代表时间。 $Controls$ 为控制变量集; δ_i 为母国固定效应, τ_j 为东道国固定效应, π_k 是行业固定效应, φ_t 为时间固定效应, γ_{ij} 为母国—东道国固定效应; ε_{ijkt} 为随机扰动项。

考虑到样本数据包含多个维度, 为减少遗漏变量偏误, 本文同时控制母国和东道国层面的控制变量。参考陈东和秦子洋 (2022), 选取如下母国层面的控制变量: 行业规模 ($Size$), 以行业总产出的对数值衡量; 要素产出 (FS), 以行业劳动报酬与行业总产出之比的对数值表示; 中间品使用 (II), 以行业中间投入的对数值表示; 资本劳动比 (KL), 以行业资本存量与劳动力就业人数之比的对数值衡量; 资本深化 (CD), 以行业资本存量与增加值之比的对数值表示。选取的东道国层面的控制变量包括: 经济发展水平 ($PGDP$), 以人均 GDP 的对数值表示; 劳动力规模 ($Employment$), 以 15 岁以上就业人口占总人口比重的对数值表示; 工业增加值 (VA), 以工业增加值占 GDP 比重的对数值表示; 贸易条件 (TOT), 用净易货贸易条件指数的对数值表示。选取的母国—东道国控制变量包括: 冰山成本 (Ice), 以各国首都之间的距离与国际油价乘积的对数值表示; 东道国是否是殖民地 ($Colony$); 两国是否接壤 ($Contig$); 两国是否有共同语言 ($Comlang$)。^①

四、实证结果与分析

1. 基准回归结果

表 1 汇报了基于式 (18) 的估计结果。从第 (1)—(6) 列可以看出, 不论控制何种层面的控制变量和固定效应, 且不论采用相对指标 (CLQ) 还是空间指标 (TS) 衡量对外产业转移, 机器人安装存量 ($Robot$) 对产业转移的影响系数始终在 1% 的水平上显著为负, 表明机器人应用显著减少了对外产业转移的相对数量和空间数量。在控制所有变量和固定效应的情况下, 机器人安装量每增加 1%, 对外产业转移的相对数量减少 1.35%, 相对净流量减少 2.18%。机器人应用延缓对外产业转移的可能原因在于: ① 机器人应用可以替代一些繁重、重复和危险的劳动任务, 在减少劳动力需求的同时,

^① 描述性统计结果参见《中国工业经济》网站 (ciejournal.ajcass.com) 附件。

降低了对低成本劳动力国家的依赖,减弱了对外产业转移的动力;②机器人应用通过降低生产成本、提高生产效率和提升产品质量,扩大了行业出口规模(Brynjolfsson et al., 2019),从而替代部分海外投资,减少对外产业转移;③机器人应用还有可能加剧国家之间的利益博弈,提高行业投资壁垒,由此减少了对外产业转移的可能性。控制变量的结果还显示,要素产出对被解释变量的影响均显著为正,工业增加值和资本深化则显著为负,说明劳动产出比越大、行业资本深化程度越低、工业增加值越低的产业,越倾向于对外产业转移,与马亚明等(2021)的研究结论不谋而合。

表 1 基准回归结果

变量	CLQ			TS		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Robot</i>	-0.0146*** (-10.1509)	-0.0060*** (-5.9178)	-0.0135*** (-9.8637)	-0.0287*** (-9.6771)	-0.0289*** (-9.9125)	-0.0218*** (-8.5846)
母国控制变量	是	是	是	是	是	是
东道国控制变量	是	是	是	是	是	是
母国—东道国控制变量	否	是	否	否	是	否
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是
母国固定效应	是	是	是	是	是	是
东道国固定效应	是	是	是	是	是	是
母国—东道国固定效应	否	否	是	否	否	是
样本量	25709	24474	24385	25709	24474	24385
R ²	0.9660	0.9836	0.9704	0.6688	0.5655	0.7570

注:括号内数值为t值;回归系数的标准误为稳健标准误;***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平,以下各表同。后文若无特殊说明,均控制了母国控制变量、东道国控制变量、母国—东道国控制变量、年份固定效应、行业固定效应、母国固定效应和东道国固定效应、母国—东道国固定效应。

2. 内生性问题

本文在对机器人应用与对外产业转移的关系进行因果识别时,必须考虑两种可能的内生性来源:一是逆向因果问题。一些国家为了避免“产业空心化”,会鼓励那些有可能外迁的行业推进机器人应用进程,将有外迁意愿的行业留在母国;同时,企业在减少对外产业转移后,为保持技术优势往往会加大研发投入,反向促进机器人应用水平提高(孙晓华等,2018)。二是遗漏变量偏误。由于影响对外产业转移的因素十分复杂,难以控制所有因素,可能导致误差项与解释变量高度相关。

为了解决潜在的内生性问题,本文借鉴Bahar and Rapoport(2018)的思想,引入合成工具变量。本文按照以下步骤合成工具变量:①选取国家代码虚拟变量、国家所属大洲虚拟变量、国家所属政体虚拟变量等反映国家一般外生性特征的变量作为第一组解释变量,并将其与年份虚拟变量交乘,以考虑这些虚拟变量跨时期的差异影响。②选取各国人口排名、各国GDP排名、各国制造业占比排名等影响对外产业转移的上层指标作为另一组解释变量,并设置行业—年份双向固定效应。③将机器人应用变量*Robot*作为被解释变量进行回归,提取*Robot*的预测值作为合成工具变量,即*Robot_hat*。一方面,国家层面的特征变量会影响机器人应用水平,满足工具变量的相关性要求;另一方面,国家层面的特征变量作为对外产业转移的上层指标,具有相对外生性。表2第(1)列汇报了第一阶段回归结果,*Robot_hat*和*Robot*之间存在显著的正相关关系,且Kleibergen-Paap rk F值远大于临界值16.38,可以排除弱工具变量问题;第(2)、(3)列依次汇报了*Robot*对CLQ和TS影响的第二阶段回归结果。利用工具变量法矫正内生性问题后,*Robot*对两个被解释变量的影响方向不变,证实了本文结论的稳健性。

表2 内生性问题

变量	合成工具变量			轻型工业机器人技术冲击		
	<i>Robot</i> (1)	<i>CLQ</i> (2)	<i>TS</i> (3)	<i>Robot</i> (4)	<i>CLQ</i> (5)	<i>TS</i> (6)
<i>Robot_hat</i>	1.5367*** (59.2204)					
<i>Robot_shock</i>				0.1061*** (37.2278)		
<i>Robot</i>		-0.0107*** (-2.8492)	-0.0683*** (-8.7845)		-0.0505*** (-10.1242)	-0.0895*** (-10.0797)
KP rk Wald F	3507.0510			1385.9080		
样本量	24385	24385	24385	24385	24385	24385

借鉴杨光和侯钰(2020)的做法,将2006年轻型工业机器人的发明和使用这一外生冲击作为机器人应用的工具变量。具体而言,本文将某年是否发生轻型工业机器人冲击与各国完成工业革命的时间交乘,得到本文的第二个工具变量 *Robot_shock*。轻型工业机器人技术冲击作为全球性技术冲击,外生性较强,且与机器人应用发展密切相关,满足工具变量的外生性和相关性条件。表2第(4)一(6)列的估计结果显示,工具变量 *Robot_shock*的回归系数显著为正,同样拒绝了弱工具变量假设;*Robot*依然显著减少了对外产业转移,进一步证明了基准结论的可信性。

值得注意的是,两个工具变量的估计系数均出现了不同程度的膨胀,因此,需要考虑在不满足工具变量外生性条件下严格识别。故本文进一步使用不完美工具变量法(IIV)进行估计。不完美工具变量法放松了工具变量无相关假设的要求:一方面,该方法仅要求工具变量与误差项相关系数(ρ_{ze})的方向和内生解释变量与误差项相关系数(ρ_{xe})的方向相同,即 $\rho_{ze}\rho_{xe} \geq 0$;另一方面,IIV要求工具变量的内生程度要小于内生解释变量的内生程度,即 $|\rho_{ze}| < |\rho_{xe}|$ 。在满足上述两个放松条件的前提下,使用两个不完美程度具有差异的工具变量 IV_1 和 IV_2 ,并参照Nevo and Rosen(2012)的做法,构造新的工具变量 $\omega(\gamma) = \gamma IV_1 - (1-\gamma) IV_2$,最终可以生成更窄的双边区间。由表2第(1)、(4)列可知,*Robot*与两个工具变量均存在显著正相关关系,那么*Robot*与误差项的相关性理应方向一致;同时,*Robot_hat*和*Robot_shock*相较于*Robot*的内生性也应当更小,故满足IIV的两个基本前提。根据IIV检验,*Robot*对*CLQ*的系数估计区间为 $[-0.08, -0.04]$,对*TS*的系数估计区间为 $[-0.09, -0.06]$,*Robot*的系数估计值上界均小于0,说明尽管工具变量不完全外生,但是依然可以准确识别机器人应用影响对外产业转移的方向。

3. 稳健性检验

为了证实基准结论的可信性,本文从多个维度进行稳健性检验^①:①针对可能的模型选择偏误。一方面,本文在控制变量中引入滞后一期对外产业转移变量,并使用差分GMM和系统GMM分别进行估计;另一方面,本文使用倾向得分匹配(PSM)中的熵匹配方法对其进行检验。②针对可能的变量选择偏误。在被解释变量方面,本文在被解释变量的基础上计算对外产业转移增速的相对指标和空间指标。在核心解释变量方面,本文选用滞后一期的机器人安装流量、行业机器人密度和考虑5%折旧率的机器人安装存量作为替代指标。③针对可能的样本选择偏误。本文从剔除机器人应用的主导行业、剔除统计出现重大变化国家、使用更能反映主动对外产业转移的绿地投资数

① 稳健性检验结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

据、剔除 WIOD 数据库中提供的控制变量以延长样本区间、使用 2003—2018 年母国—东道国一年份层面的数据进行检验。④针对可能的外部因素干扰。一方面,本文将母国和东道国是否是 WTO 成员国与时间趋势的交互项、母国和东道国是否是欧盟成员国与时间趋势的交互项、母国和东道国之间是否签订区域性经贸合作协定,均作为控制变量纳入基准回归模型;本文将各国各行业遭受反倾销案件数、遭受的特别保障措施案件数、遭受的反补贴案件数作为控制变量纳入回归。另一方面,为排除金融危机影响,删除 2008—2009 年的样本后重新回归;为排除重点国家事件影响,删除 2012 年及以后的样本后再次回归;为排除政治因素和其他不确定因素的影响,将政治立场相似度、世界不确定性指数、外部冲突指数纳入基准方程;为严密控制潜在遗漏变量,将固定效应更换为行业—年份固定效应、母国—年份联合固定效应、东道国—年份联合固定效应、母国—东道国固定效应。

五、作用渠道分析

前文回归结果表明,机器人应用会显著减缓对外产业转移,而这一抑制作用背后的渠道如何,尚待进一步考察。一方面,为了排除渠道分析中内生性因素的干扰,本文借鉴 Alesina and Zhuravskaya(2011)的做法,继续沿用 *Robot_hat* 作为工具变量,将相关解释变量的工具变量引入因果识别过程,并在每一步回归中采用 2SLS,以解决非随机带来的内生性偏误。另一方面,本文采用数值模拟的方式,对作用渠道进行敏感性分析。通过调整渠道检验的参数取值,比较在不同参数取值下机器人应用对产业转移的影响,以确定主要的作用渠道。

1. 作用渠道检验

由上文理论模型可知,对外产业转移同时受到“推力”因素和“拉力”因素的共同影响。其中,“拉力”包括相对工资渠道、出口替代渠道和利益博弈渠道,引导产业链留在母国;“推力”包括相对产能渠道和行业竞争渠道,助推对外产业转移。据此,本文从实证层面加以验证,以全面厘清深层次的作用路径。

(1)相对工资渠道。由理论模型可知,机器人应用可以替代部分低技能劳动力,引发劳动力市场上的相对工资变动,从而影响对外产业转移的动力。机器人应用降低了对低技能劳动力的需求,劳动力市场出现极化效应,低技能劳动力呈现出供大于求的状态,所获得的劳动报酬也相对降低(Acemoglu and Restrepo, 2020)。考虑到包含劳动力成本在内的生产成本是影响跨国公司区位选择的主要因素,本文将相对工资(*Wage*)作为该渠道的代理变量,以母国劳动报酬与东道国同行业劳动报酬比值的对数形式衡量,数据来源于 WIOD-SEA 数据库。表 3 第(1)列的结果显示,*Robot* 对 *Wage* 的影响显著为负,表明机器人应用水平的提高显著降低了相对工资水平;第(2)、(3)列的结果显示,将相对工资作为控制变量纳入模型后,机器人应用水平的提升显著延缓了对外产业转移;同时,相对工资的降低也是减少对外产业转移的显著影响因素,说明相对工资的降低减少了跨国公司对东道国低廉劳动力的寻求动机,降低了对外产业转移的意愿。

(2)出口替代渠道。根据本文的理论模型,当机器人应用引致的产出利得高于贸易成本损失,即出口利润高于投资收益时,企业会选择出口而非 OFDI。同时,根据 Brynjolfsson et al.(2019)的研究,机器人应用对出口规模具有显著的提升作用,而母国出口的不断增长有可能会抑制 OFDI 的步伐,因此,出口替代可能是机器人应用抑制对外产业转移的渠道之一。为了证实这一点,本文将 CEPII-BACI 数据库中出口国—产品—进口国—年份层面的出口数据加总至出口国—行业—进口国—年份层面,得到行业层面出口数据,并采用行业出口占比(*Export*)作为渠道变量。表 3 第(4)—(6)列的估计结果显示,*Robot* 对 *Export* 的影响显著为正,表明机器人应用显著扩大了行业出口规

表3 相对工资渠道和出口替代渠道

变量	相对工资			出口替代		
	<i>Wage</i> (1)	<i>CLQ</i> (2)	<i>TS</i> (3)	<i>Export</i> (4)	<i>CLQ</i> (5)	<i>TS</i> (6)
<i>Robot</i>	-0.0543*** (-5.9385)	-0.0070° (-1.8786)	-0.0662*** (-8.3710)	0.0205*** (9.9223)	-0.0082** (-2.1808)	-0.0668*** (-8.5905)
<i>Wage</i>		0.0685*** (17.4641)	0.0397*** (5.9143)			
<i>Export</i>					-0.1228*** (-12.5822)	-0.0705*** (-3.2907)
KP rk Wald F	3583.9260	3349.4380	3349.4380	3583.9260	3450.5200	3450.5200
观测值	26529	24385	24385	26529	24385	24385

模;将行业出口作为控制变量纳入模型后, *Robot* 和 *Export* 对产业转移的影响均显著为负,表明机器人应用可以通过扩大行业出口规模减少对外产业转移。究其原因:一方面,机器人应用通过降低生产成本、提高生产效率和提升产品质量,能够扩大行业出口规模,而 OFDI 与出口相比,具有高风险和高沉没成本的特性,因此,出口规模增长成为跨国公司盈利的替代手段;另一方面,在数字经济时代,投资规则更加复杂多样,将产业转移至东道国可能会涉及更高的投资风险,跨国公司可能会以出口代替海外投资,以规避外迁风险。

(3)利益博弈渠道。理论模型推导表明,本国机器人应用会提高产业转移至部分东道国的风险系数,提高离岸门槛,抑制对外产业转移。同时,对外产业转移既是新一轮科技革命和产业变革的重要组成部分,也是国际格局嬗变中多种因素相互作用、相互交织的结果,并且越来越多的迹象表明国家之间的博弈已成为影响全球资源配置的更深远因素。为了检验机器人应用是否会通过加剧国家之间的利益博弈来影响对外产业转移,本文借鉴马亚明等(2021)的做法,将各国负面清单中不符措施的累计限制强度(*CSD*)作为各行业利益博弈的代理变量,数据来源于UNCTAD的投资者政府间投资争端数据库(*ISDS Navigator*)。选取该代理变量的理由在于,某行业发生国际投资争端的数量在一定程度上可以反映该行业的投资风险强度(马亚明等,2021),而投资风险越大、不确定性越强,国际直接投资活动越少。表4第(1)一(3)列的结果显示, *Robot* 对 *CSD* 的影响显著为正,表明机器人应用普及显著增加了行业投资壁垒;将 *CSD* 作为控制变量纳入模型后, *Robot* 和 *CSD* 对产业转移的影响均显著为负,说明机器人应用会通过提高投资壁垒减少对外产业转移。一方面,机器人应用会缩小国家之间的经济差距(陈东和秦子洋,2022),某些发达国家为保持自身优势,增加了对机器人应用发展迅速国家的制裁,导致其产业难以外迁;另一方面,面对中美之间的大国竞争升级,跨国公司的风险偏好明显弱化,生产布局从“效率优先”转为“战略优先”,减少了对利益博弈国家的产业转移。

(4)相对产能渠道。根据理论模型,机器人作为一种物化性技术进步,通过替代低技能劳动力,可以有效提高企业生产效率(Acemoglu and Restrepo, 2020;陈东和秦子洋,2022)。而部分企业在应用机器人、提升生产效率后,不仅提高了产业链在国外环节的产出,还增加了其在国内环节的产出,导致行业产出不断增加。当行业产出高于国内市场的最大需求时,就会出现产能过剩,此时企业会考虑对外产业转移,以消化过剩产能。本文参考周亚虹等(2012)的做法,使用人均增加值衡量行业产出绩效,并使用母国行业与东道国行业产出绩效之比的对数值衡量母国市场的相对产能状况

表 4 利益博弈渠道和相对产能渠道

变量	利益博弈			相对产能		
	<i>CSD</i> (1)	<i>CLQ</i> (2)	<i>TS</i> (3)	<i>Output</i> (4)	<i>CLQ</i> (5)	<i>TS</i> (6)
<i>Robot</i>	0.0066** (2.0900)	-0.0101*** (-2.7006)	-0.0672*** (-8.7019)	0.1249*** (8.5920)	-0.0159*** (-4.3640)	-0.0708*** (-9.1792)
<i>CSD</i>		-0.0922*** (-8.4906)	-0.1582*** (-11.3005)			
<i>Output</i>					0.0382*** (18.5740)	0.0184*** (7.0507)
KP rk Wald F	3583.9260	3508.4000	3508.4000	3583.9260	3577.7830	3577.7830
观测值	26529	24385	24385	26529	24385	24385

(*Output*), 数据来源于 WIOD-SEA 数据库。表 4 第(4)一(6)列的结果显示, *Robot* 对 *Output* 的影响显著为正, 表明机器人应用显著提高了行业相对产能; 将 *Output* 纳入模型后, 相对产能对产业转移的影响均显著为正, 表明机器人应用会通过提高相对产能推动对外产业转移。可能的原因在于: 一方面, 机器人使用带来的生产率提高会使部分企业跨越生产率门槛, 提高企业的投资积极性, 促进对外产业转移; 另一方面, 机器人在提高生产率的同时, 可以提高企业的创新水平, 有助于增强企业的国际市场竞争力, 促进对外产业转移。

(5) 行业竞争渠道。理论模型分析发现, 机器人应用会改变产业结构和市场竞争格局, 导致母国国内的竞争压力增加, 单个企业的国内生产利润降低, 对外产业转移的动力明显增强。为了验证这一点, 本文借鉴侯欣裕等(2020)的做法计算行业侵蚀性竞争, 并使用母国行业与东道国行业侵蚀性竞争之比的对数值衡量母国市场的相对竞争程度(*Comp*)。如表 5 第(1)一(3)列的结果所示, 在

表 5 相对竞争渠道和合力渠道

变量	相对竞争			合力	
	<i>Comp</i> (1)	<i>CLQ</i> (2)	<i>TS</i> (3)	<i>CLQ</i> (4)	<i>TS</i> (5)
<i>Robot</i>	0.0481*** (7.5757)	-0.0113*** (-2.9616)	-0.0691*** (-8.8228)	-0.0115*** (-3.1153)	-0.0682*** (-8.6679)
<i>Comp</i>		0.0108*** (5.3435)	0.0169*** (3.7071)	0.0106*** (5.2059)	0.0151*** (3.2765)
<i>Output</i>				0.0347*** (17.5950)	0.0142*** (5.4427)
<i>Wage</i>				0.0546*** (15.5588)	0.0253*** (3.7087)
<i>Export</i>				-0.0678*** (-7.6978)	-0.0263 (-1.2158)
<i>CSD</i>				-0.0261** (-2.5497)	-0.1289*** (-8.9239)
KP rk Wald F	3583.9260	3466.0530	3466.0530	3364.4920	3364.4920
观测值	26529	24385	24385	24385	24385

第一阶段, *Robot* 对 *Comp* 的影响显著为正; 在第二阶段, *Comp* 对被解释变量的影响均显著为正, 表明在克服内生性问题后, 机器人应用显著增加了母国的行业竞争压力, 迫使部分产业链不得不逃离激烈的国内竞争, 迁往竞争压力小的东道国。究其原因, 机器人应用增加了新企业的进入, 减少了原有企业的退出, 增加了同质产品的生产企业数量, 引发更加激烈的“侵蚀性竞争”, 导致一些国内企业不得不通过对外产业转移, 寻求更广阔的市场和更优的资源配置。

2. 敏感性分析

如上所述, 机器人应用不仅通过降低相对工资、扩大出口份额和加剧利益博弈渠道将产业“拉”回国内, 还通过提高相对产能和增加市场竞争等渠道将产业“推”出去, 但是两方力量孰强孰弱尚不得而知。为区分不同作用渠道对产业转移的重要性, 本文做如下敏感性分析: 首先假设所有渠道均发挥作用, 分析机器人安装增加至 1%、2%……15% 时 *CLQ* 和 *TS* 的变化量; 其次假设某些渠道不存在, 重新计算 *CLQ* 和 *TS* 下降的单位数。结果见图 1。

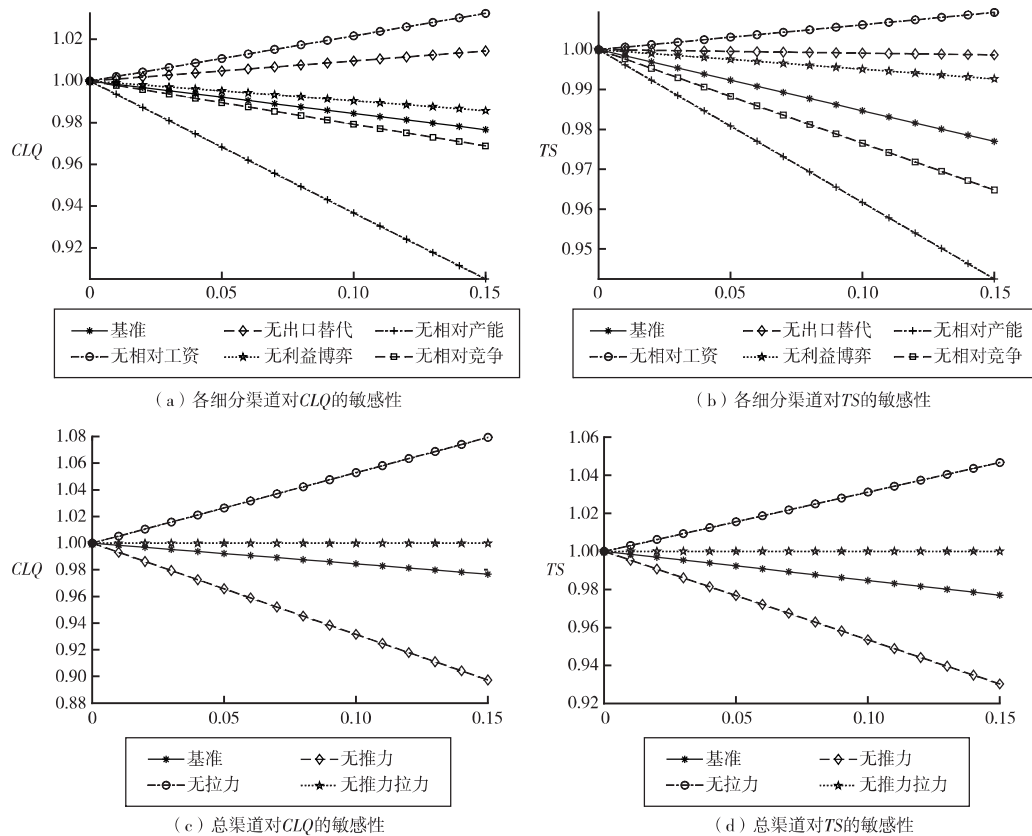


图1 敏感性分析

注: 在图(a)、(b)中, 横轴为机器人安装量增加的比例, 纵轴为对外产业转移相对规模或空间规模的单位数; 星号线代表所有渠道均发挥作用时机器人应用对产业转移的影响, 而圆圈线、菱形线、五角星线、十字线和方块线分别反映人为消除相对工资、出口替代、利益博弈、相对产能和市场竞争渠道后机器人应用对产业转移的影响。在图(c)、(d)中, 星号线依然代表所有渠道均发挥作用时机器人应用对产业转移的影响, 而圆圈线、菱形线和星线分别代表人为消除拉力、推力、拉力和推力渠道后机器人应用对产业转移的影响。

为便于观察,本文将无机器人安装时的 *CLQ* 和 *TS* 标准化为 1。从图 1(a)、(b)中可以发现,各渠道对产业转移的相对贡献随着机器人安装量的增加而出现差异。以对外产业转移的相对规模 *CLQ* 为例,当机器人安装量从增加 1% 变为增加 15% 时,不仅基准情况下 *CLQ* 会减少 2.33%,而且当相对工资、出口替代和利益博弈依次不发挥作用时,*CLQ* 分别会增加 3.25%、增加 1.44% 和减少 1.42%。对产业转移的空间规模 *TS* 而言,其变化模式几乎相同。这表明,随着机器人安装量的增加,任何渠道的缺失都会显著影响对外产业转移。

为进一步比较“拉力”和“推力”的相对大小,本文分别对比拉力、推力和二者同时不存在情形下机器人安装量对产业转移的影响力度。从图 1(c)、(d)中可以发现,同样以对外产业转移的相对规模 *CLQ* 为例,机器人安装量增加 1% 时,基准情况下 *CLQ* 会减少 0.16%;当推力、拉力依次不发挥作用时,*CLQ* 会减少 0.68% 和增加 0.53%。由此可见,相较于基准情形,拉力渠道较之推力渠道的影响力度更大,且拉力渠道的消失会影响对外产业转移方向,表明在两方力量的较量中,拉力大于推力,二者的合力最终表现为对外产业转移的减少。

根据表 3 第(1)、(4)列,表 4 第(3)列,以及表 5 第(1)、(4)列的结果,表 6 的计算结果显示,机器人增速每增加 1%,会使行业相对工资降低 0.3726%,出口占比增加 0.2460%,投资壁垒增加 0.0644%,相对产能提高 0.4750%,市场竞争增加 0.0518%;同时,上述五个渠道在减少对外产业转移中的贡献占比分别约为 30.7975%、20.3333%、5.3230%、39.2614% 和 4.2849%。该结果表明拉力渠道的占比 (56.4538%) 高于推力渠道占比 (43.5463%),与上述敏感性分析的结论保持一致,拉力渠道为主要影响渠道。

表 6 各渠道贡献占比 单位: %

变量	<i>CLQ</i>		<i>TS</i>	
	变动百分比 (1)	贡献占比 (2)	变动百分比 (3)	贡献占比 (4)
<i>Wage</i>	0.3726	30.7975	0.2160	0.1747
<i>Export</i>	0.2460	20.3333	0.1400	0.1445
<i>CSD</i>	0.0644	5.3230	0.1106	0.1408
<i>Output</i>	0.4750	39.2614	0.2250	0.2298
<i>Comp</i>	0.0518	4.2849	0.0816	0.0813

六、基于“二元悖论”的进一步讨论

在经济开放过程中,产业链可能存在“二元悖论”,即一个国家在某个产业链上具有较强的国际竞争力,与该产业链的完全自主可控、不依赖进口,两者难以同时实现。换言之,一国产业安全性的提高需要以生产效率的降低为代价,深入参与国际分工、嵌入全球价值链则需要以生产效率的提高为基础,产业安全性和产业竞争力无法同时兼顾。同时,无论是发展中国家还是发达国家,均面临国家产业链“二元悖论”困境(徐奇渊等,2022)。而一国要保持相对完整的产业体系,就需要在产业安全性与深入参与国际分工之间找到平衡。因此,本文进一步考察这一结果如何同时影响产业影响力和脆弱性,以判断能否在一定程度上影响产业链“二元悖论”,这一答案对于兼顾产业链效率与

安全、平衡参与全球分工程度与降低经济风险具有重要借鉴意义。

为检验机器人应用的对外产业转移抑制效应是否能进一步影响产业影响力和脆弱性,本文借鉴 Kim et al.(2021)的做法,通过估计两阶段模型,识别机器人应用导致的对外产业转移抑制效应对产业链“二元悖论”的实际影响。具体而言,在第一阶段,本文将基准回归模型转换成如下差分模型,由第一阶段回归模型估计的被解释变量的拟合值 $\widehat{CLQ}(\widehat{TS})$ 反映机器人应用的对外产业转移抑制效应:

$$CLQ(TS)_{ijkt} = \beta_0 + \Delta Robot_{ikt-1} + \beta \Delta Controls + \delta_i + \tau_j + \pi_k + \varphi_t + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijkt} \quad (19)$$

在第二阶段,通过构建式(20)检验因机器人应用导致的对外产业转移减缓效应对产业影响力和脆弱性的影响:

$$\Delta M1(\Delta M2)_{ikt} = \gamma_0 + \gamma_1 \widehat{CLQ}(\widehat{TS})_{ijkt} + \theta \Delta Controls + \delta_i + \tau_j + \pi_k + \varphi_t + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijkt} \quad (20)$$

其中,被解释变量方面, $\Delta M1$ 为产业影响力指标的变化量, $\Delta M2$ 为产业脆弱性指标的变化量,此时核心解释变量是第一阶段回归模型估计的 $\widehat{CLQ}(\widehat{TS})$ 拟合值。

表7中第(1)、(2)列汇报了第一阶段结果, $\Delta Robot$ 与 $CLQ(TS)$ 之间均显著为负,表明机器人应用显著减缓了对外产业转移;第(3)一(12)列汇报了第二阶段结果。

表7 对产业脆弱性和影响力的检验

变量	(A)第一阶段		(B)产业脆弱性第二阶段			
	CLQ	TS	$\Delta Fragility$		ΔCV	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\Delta Robot$	-0.0114*** (-8.4530)	-0.0063*** (-3.2925)				
\widehat{CLQ}			-0.3244*** (-10.4791)		-0.5448** (-2.5489)	
\widehat{TS}				-0.5858*** (-10.4791)		-0.5858*** (-10.4791)
观测值	24385	24385	24385	24385	24385	24385
R ²	0.9704	0.7561	0.0884	0.0884	0.0499	0.0884
变量	(C)产业影响力第二阶段					
	$\Delta Impact$		ΔIU		ΔID	
	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
\widehat{CLQ}	0.1860*** (2.8957)		0.3350*** (2.8336)		0.3263*** (2.7945)	
\widehat{TS}		0.3358*** (2.8957)		0.6049*** (2.8336)		0.5892*** (2.7945)
观测值	24385	24385	24385	24385	24385	24385
R ²	0.0568	0.0568	0.2484	0.2484	0.2507	0.2507

1. 机器人应用与产业脆弱性

本文借鉴崔晓敏等(2022)的方法,使用贸易网络分析法,通过剔除本国出口后的出口中心度变

异指数和进口市场集中度指数,计算国家—行业层面的产业脆弱性指标(*Fragility*),脆弱性指数越大,贸易网络越集中,行业脆弱性就越高。同时,本文还从投入产出角度构建产业脆弱性指标(*CV*),以增强结论的可信性。

表7中第(3)—(6)列的结果表明, $\widehat{CLQ}(TS)$ 对 $\Delta Fragility$ 和 ΔCV 的系数至少在5%的水平上显著为负,说明机器人应用的对外产业转移抑制效应显著降低了该产业的脆弱性,增强了产业链韧性和竞争力。究其原因:一方面,机器人应用可以实现生产过程的自动化,减少了对低成本劳动力的依赖,降低了对外产业转移动机;同时,通过提高生产效率和降低成本,并减少生产环节中的人为错误,可以提高产业链的稳定性。另一方面,机器人应用推动了新兴技术和创新的发展,可以帮助企业进行资源和成本优化,降低对外部供应链的依赖,减少对外产业转移。通过不断探索和应用人工智能技术,企业可以提高产品和服务的质量、创新能力和竞争力(刘斌和潘彤,2020),减少因市场竞争压力而导致的脆弱性。

2. 机器人应用与产业影响力

本文从两个视角出发,更为全面地构建产业影响力指标。第一个视角是,考虑到一国的高中心度产品数目越多、金额越大,则该国在全球产业链上的话语权和影响力就越高,本文借鉴徐奇渊等(2022)的做法,将出口数目中心度和出口金额中心度均位列前25%的产品定义为高出口中心度产品,并计算各国各行业高出口中心度产品的数目,将其对数形式作为产业影响力(*Impact*)的代理变量。第二个视角是,考虑到网络分析法难以反映产业间的分配情况,忽视了行业间要素资源配置状况,本文分别从投入和产出角度构建基于产出的产业影响力指数(*IU*)和基于投入的产业影响力指数(*ID*)。

表7中第(7)—(12)列的结果显示,不论采用何种指标反映产业影响力, $\widehat{CLQ}(TS)$ 对产业影响力指标的系数始终在1%的水平上显著为正,表明机器人在减缓对外产业转移后,提高了该产业在全球产业链中的地位,增强了产业影响力。究其原因:一方面,机器人作为一项通用性技术,可以优化生产流程、自动化生产过程和提高产品质量,不仅降低了企业的外迁需求,而且使企业更具竞争力地生产产品和提供服务,提高市场份额,增强了在国际市场上的竞争力和影响力;另一方面,机器人应用存在技术集群效应,不仅会减少对外产业转移,还会吸引其他配套产业入驻,产业的聚集和创新活动可以提高产业的竞争力和创新能力,增强该产业在全球范围内的影响力。

七、结论与启示

近年来全球产业链加速重构,如何进一步减少规模过大、速度过快的对外产业转移、维护产业链稳定安全,已成为中国乃至世界各国关心的重要经济问题之一。本文在理论建模的基础上,使用IFR机器人安装数据、iDi Markets绿地投资数据和Zephyr跨国并购数据三者的合并数据,实证检验机器人应用对产业转移的影响,并进一步讨论机器人应用在全球产业链重塑中的重要作用。结果表明:①机器人应用总体减少了对外产业转移的相对规模和相对净流量,在经过内生性检验、更换估计方法、替代核心变量、改变样本范围、排除其他因素干扰等一系列稳健性检验后,该结论依然成立。②机器人应用不仅通过降低相对工资、增加出口替代、加剧利益博弈等拉力渠道延缓对外产业转移,还通过提高相对产能和增加行业竞争等推力渠道增加对外产业转移,且拉力渠道的作用强于推力渠道,拉力渠道中相对工资渠道占据主导作用,最终合力表现为抑制对外产业转移。③机器人应用在延缓对外产业转移的同时,还有助于增加产业影响力,降低产业脆弱

性,在一定程度上缓解了对产业链“二元悖论”的冲击。基于以上研究结论,本文提出如下政策启示:

(1)财政支持上,应提供税收优惠和资金支持,鼓励企业采用机器人技术。本文的研究结论表明,机器人应用不仅是抑制对外产业转移的有效手段,而且有助于兼顾产业影响力和脆弱性。但在现实经济生活中,自动化设备及生产线的研制投入大,改造门槛高,实施风险大,投入后无法获得立竿见影的效果,导致许多企业望而却步。在这种情况下,可以筛选重点企业实施机器人应用改造,对取得的先进示范成果进行推广,并由政府根据示范成效给予一定资金补贴,以期降低企业智能化转型成本,扩大智能化技术的应用范围,加速人工智能技术与传统行业、新型行业进行深度融合。

(2)应用策略上,应依据市场实际状况和要素禀赋条件,合理有序地规划机器人应用进程,避免“一刀切”式的机器人推进策略。本文研究发现,机器人应用不仅存在引导产业链留在母国的“拉力”作用,也存在推动对外产业转移的“推力”作用。因此,应当对不同行业的不同企业采取差异化战略,助“拉力”而轻“推力”。其中,对于产能过剩和竞争激烈的行业,通过政策引导和市场培育,提升国内消费需求,搭建国际合作交流平台,拓宽国际市场,降低机器人应用的“推力”作用;对于以出口为主的企业,要为其提供政策扶持和出口优惠政策,鼓励同一产业链上的企业组建产业联盟,共同推广机器人技术,提高出口利润,替代产业转移。

(3)政策支持上,面对低端制造业的高外迁风险和高端制造业的低国际竞争力,政府相关部门应采取倾斜政策,推动机器人的低端嵌入和高端研发。一方面,鼓励机器人嵌入,强化低端制造业产业链关键环节的本土化生产能力。通过将符合条件的机器人应用项目纳入重大项目统一管理,遴选发布机器人典型应用场景,将优秀机器人应用企业列入创新企业、重大装备目录支持推广,实现机器人应用技术的聚集和共享,降低“断链”风险,提高产业链整体的抗风险能力。另一方面,实施人工智能+应用示范赋能行动,加强高端制造业产业链的国际竞争力。开展人工智能关键技术攻关、加强算法支撑体系建设、布局智算基础设施、推动算力高效运载、强化普惠算力供给等任务,加快工业机器人向智能机器人的升级,充分利用人工智能技术的优势“补齐短板”“拉长长板”“锻造新板”,不断增强产业链竞争力。

〔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].经济研究,2022,(4):85-102.
- [2]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,(7):47-63.
- [3]崔晓敏,熊婉婷,杨盼盼,徐奇渊.全球供应链脆弱性测度——基于贸易网络方法的分析[J].统计研究,2022,(8):38-52.
- [4]戴翔,刘梦,任志成.劳动力演化如何影响中国工业发展:转移还是转型[J].中国工业经济,2016,(9):24-40.
- [5]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].中国工业经济,2021,(10):117-135.
- [6]侯欣裕,陈璐瑶,孙浦阳.市场重合、侵蚀性竞争与出口质量[J].世界经济,2020,(3):93-116.
- [7]黄亮雄,林子月,王贤彬.工业机器人应用与全球价值链重构——基于出口产品议价能力的视角[J].中国工业经济,2023,(2):74-92.
- [8]李磊,马欢,徐刚.最低工资、机器人使用与企业退出[J].世界经济,2023,(1):121-145.
- [9]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].数量经济技术经济研究,2020,(10):24-44.
- [10]吕越,谷玮,包群.人工智能与中国企业参与全球价值链分工[J].中国工业经济,2020,(5):80-98.
- [11]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].中国工业经济,2024,(1):56-74.
- [12]马亚明,陆建明,李磊.负面清单模式国际投资协定的信号效应及其对国际直接投资的影响[J].经济研究,2021,(11):155-172.
- [13]孙晓华,郭旭,王昀.产业转移、要素集聚与地区经济发展[J].管理世界,2018,(5):47-62.
- [14]熊雪如.产业有序转移与区域经济协调发展作用机制研究[M].北京:经济科学出版社,2015.
- [15]徐奇渊,东艳等.全球产业链重塑:中国的选择[M].北京:中国人民大学出版社,2022.
- [16]杨光,侯钰.工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J].中国工业经济,2020,(10):138-156.
- [17]周亚虹,贺小丹,沈瑶.中国工业企业自主创新的影响因素和产出绩效研究[J].经济研究,2012,(5):107-119.
- [18]Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets[J]. *Journal of Political Economy*, 2020, 128(6): 2188-2244.
- [19]Alesina, A., and E. Zhuravskaya. Segregation and the Quality of Government in a Cross Section of Countries [J]. *American Economic Review*, 2011, 101(5): 1872-1911.
- [20]Bahar, D., and H. Rapoport. Migration, Knowledge Diffusion and the Comparative Advantage of Nations [J]. *Economic Journal*, 2018, 128(612): 273-305.
- [21]Brynjolfsson, E., X. Hui, and M. Liu. Does Machine Translation Affect International Trade? Evidence from a Large Digital Platform[J]. *Management Science*, 2019, 65(12): 5449-5460.
- [22]Cilekoglu, A. A., R. Moreno, and R. Ramos. The Impact of Robot Adoption on Global Sourcing[J]. *Research Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2024.104953>, 2024.
- [23]Fan, H., F. Lin, and L. Tang. Minimum Wage and Outward FDI from China[J]. *Journal of Development Economics*, 2018, 135: 1-19.
- [24]Gasiorek, M., I. Serwicka, and A. Smith. Which Manufacturing Industries and Sectors Are Most Vulnerable to Brexit [J]. *World Economy*, 2019, 42(1): 21-56.
- [25]Hallward-Driemeier, M., and G. Nayyar. Have Robots Grounded the Flying Geese? Evidence from Greenfield FDI in Manufacturing[R]. *World Bank Policy Research Working Paper*, 2019.
- [26]Kim, Y., L. Su, Z. Wang, and H. Wu. The Effect of Trade Secrets Law on Stock Price Synchronicity: Evidence from the Inevitable Disclosure Doctrine[J]. *Accounting Review*, 2021, 96(1): 325-348.
- [27]Kovak, B., L. Oldenski, and N. Sly. The Labor Market Effects of Offshoring by US Multinational Firms[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2021, 103(2): 381-396.
- [28]Krenz, A., K. Prettnner, and H. Strulik. Robots, Reshoring, and the Lot of Low-Skilled Workers [J]. *European Economic Review*, <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2021.103744>, 2021.
- [29]Nevo, A., and A. Rosen. Identification with Imperfect Instruments[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2012, 94(3): 659-671.
- [30]Sharma, S., P. Srivastava, A. Kumar, A. Jindal, and S. Gupta. Supply Chain Vulnerability Assessment for Manufacturing Industry[J]. *Annals of Operations Research*, 2023, 326(2): 653-683.

Robot Adoption and Outward Industrial Transfer in OFDI Patterns: A Discussion on the Impact of “Binary Paradox” in Industrial Chains

QI Jian-hong^{1,2}, ZHANG Zhi-tong¹, ZHAO Wei-kang¹

(1. School of Economics, Shandong University;

2. Institute of State Governance, Shandong University)

Abstract: Ensuring the stability of the industrial chain forms the bedrock of China’s pursuit of the “dual circulation” development paradigm. Confronted with mounting pressures of outward industrial transfer, China finds it imperative to explore fresh approaches and corroborating global evidence arising from the latest wave of technological revolution and industrial transformation.

This paper builds a theoretical framework and provides evidence on the impact and pathways of robot adoption on outward industrial transfer, utilizing comprehensive country-industry data from 121 home countries and 186 host countries from 2000 to 2015. The empirical estimations show that robot adoption exerts a substantial suppressive effect on both the absolute and relative scale of outward industrial transfer. This suppression is driven by pulling forces, such as reduced relative wages, increased export substitution, and intensified game for benefits, as well as pushing forces, including enhanced industry capacity and heightened industrial competition. The pulling forces exhibit a more pronounced influence compared to the pushing forces. Robot adoption not only effectively limits outward industrial transfer but also strengthens its influence and reduces fragility, ultimately resolving the “binary paradox”, emphasizing its vital role in ensuring industrial chain security and stability, and the advancement of the “dual circulation” development paradigm in China.

At the theoretical level, this paper seeks to elucidate the mechanisms through which the application of robots influences the outward transfer of industries. It identifies both the pulling and pushing effects exerted by robotic adoption on industrial transfer. Using numerical simulations and counterfactual comparisons, this paper evaluates the relative strength of these forces. Additionally, it investigates the impact on the influence and vulnerability of the industrial chain, rethinking the “dual paradox” of industrial chains in the era of artificial intelligence (AI). At the policy level, this paper provides universal and practical conclusions regarding the relationship between AI and outward industrial transfer. It also assists China in rationally adjusting and optimizing its industrial policies, including actively implementing the “AI plus” action plan, offering crucial references for managing industrial chain risks and enhancing industrial chain resilience.

Our findings have strong policy implications. In terms of fiscal support, this paper finds that robot application is an effective means to inhibit outward industrial transfer and helps balance industry influence and vulnerability. Therefore, it is essential to accelerate the integration of AI with both conventional and new industries, promote “AI plus” initiatives, and enhance the endogenous driving force of domestic circulation. In terms of the application strategy, this paper finds that robot adoption not only has a pulling effect, keeping the industrial chain within the home country, but also a pushing effect, promoting outward industrial transfer. Therefore, differentiated strategies should be adopted for enterprises in different regions to enhance the pulling effect and reduce the pushing effect. In terms of implementation, this paper finds that the inhibitory effect of robot adoption on outward industrial transfer increases the industrial chain’s influence and reduces its vulnerability. Therefore, the government should encourage related industries to form clusters in specific regions, strengthen inter-enterprise cooperation, facilitate the aggregation and sharing of robot application technologies, and enhance the resilience of the economic “external cycle”.

Keywords: robot adoption; outward industrial transfer; pushing force; pulling force; binary paradox

JEL Classification: F21 L16 O57

[责任编辑: 覃毅]