

发达经济体机器人应用对中国的贸易与福利效应分析

张天顶, 淦苏美

[摘要] 在发达经济体大力推动“制造业回流”、加速“机器换人”的背景下,本文系统考察了其机器人普及对中国贸易与福利的多重影响。首先,基于特征事实分析,证实了政策诱导的“生产回流”现象,并发现发达经济体机器人渗透率的提升降低了中国对这些国家的出口规模。为剖析其内在机制,本文在量化贸易空间模型中引入机器人变量,将机器人价格内生化,并将使用成本细分为购置成本与调整成本。借助该模型,本文从机器人技术水平与调整成本变动两个维度,全面评估发达经济体机器人应用对中国贸易和福利的冲击。反事实模拟显示:发达经济体的机器人调整成本下降抑制了中国出口,但对福利的影响较小。发达经济体的机器人技术进步对中国影响更为复杂,一方面,减少出口贸易并损害福利;另一方面,显著降低机器人生产成本和市场价格,促使中国增加机器人进口降低生产成本,从而部分抵消前述负面效应。进一步研究表明,中国自身的机器人应用可以缓冲外部自动化冲击。就政策比较而言,提高国内机器人技术水平对出口扩张和福利增进的拉动最为显著;降低调整成本则主要提升高技能劳动者工资,对福利的作用相对较小;若二者同步推进,则抵消效应最为强劲。本文的结论不仅为衡量全球机器人应用的跨国溢出效应提供了新的理论依据与实证支撑,也为中国制定应对发达经济体机器人冲击的多维政策组合提供了重要参考。

[关键词] 生产回流; 机器人技术水平; 机器人调整成本; 贸易效应; 福利效应

[中图分类号] F124 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2025)07-0005-20

一、引言

在全球经济复苏乏力、国际局势错综复杂的当下,一些发达经济体密集出台产业政策,力推“制造业回流”并全面加速“机器换人”。发达经济体通过大规模部署工业机器人,不仅意在重振本土制造业,还希望显著提升生产效率、降低对外部劳动力的依赖,从而在全球价值链中重塑竞争优势。国际机器人联合会(IFR)数据显示,截至2019年,全球工业机器人存量为272万台,其中,日本、韩

[收稿日期] 2025-01-05

[基金项目] 国家社会科学基金重大项目“新发展阶段伟大实践与发展经济学理论创新研究”(批准号21&ZD071)。

[作者简介] 张天顶,武汉大学经济与管理学院教授,博士生导师,经济学博士;淦苏美,武汉大学经济与管理学院博士研究生。通讯作者:淦苏美,电子邮箱:zjcjgan@163.com。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,文责自负。

国、美国、德国、意大利、法国、西班牙和加拿大等发达经济体累计占比超过 50%。虽然机器人密集应用有助于降低成本、提高质量并增强灵活性,但也可能引发新兴经济体“过早去工业化”,削弱其参与全球分工的能力(Rodrik, 2018; Stemmler, 2023)。首先,机器人技术倾向替代低技能劳动并扩大对高技能劳动的需求,导致发展中国家在劳动密集型产业的比较优势不断弱化,进而压缩其贸易与分工收益以及福利;其次,自动化生产对精度和一致性的高要求远非手工操作可及,这将进一步挤压低技能劳动力的就业空间。Faber (2020)和 Kugler et al. (2020)的研究表明,美国的机器人使用对墨西哥和哥伦比亚的劳动力市场及贸易产生了负面影响。此外,Artuc et al. (2023)基于李嘉图模型的模拟结果显示,发达经济体的机器人使用通过最终产品和中间产品贸易渠道,影响了发展中国家的工资和福利。可见,发达经济体的机器人应用正通过全球价值链产生深远的跨国溢出效应,对新兴经济体的贸易利益与社会福利构成严峻挑战。

考虑中国在全球价值链中的枢纽地位,且仍保有典型的发展中国家特征,那么,发达经济体自动化带来的跨国溢出效应是否同样适用于中国? 相关文献虽不多,但已经有研究给出初步答案。李磊和马欢(2023)发现,发达经济体的机器人应用对中国外资流入形成“生产回流”效应。与其他发展中国家不同,中国自 2013 年以来一直是全球最大的工业机器人终端市场,仅 2022 年装机量便达 29 万台,占全球总量的 52%。大规模部署在一定程度上对冲了外部自动化的不利冲击(毛海涛等, 2024)。胡翠和王宁(2024)的多国多部门模型模拟进一步表明,尽管全球机器人价格下降显著降低了中国出口,但同时提升了整体福利。值得注意的是,既有理论模型普遍将机器人价格外生给定,这一假设与现实经济不符。一方面,机器人供给端高度集中,发那科(日本)、ABB(瑞士)、库卡(德国)与安川电机(日本)四家企业占据全球逾半市场;另一方面,机器人需求端则由中国、日本、韩国及欧美主要经济体共同构成。因此,机器人价格应视为供需共同作用的结果,有必要在模型中予以内生。此外,IFR 数据显示,机器人使用成本除购置成本外,还包括安装、调试、运营、维护和修理等调整成本的支出,购置成本仅占总成本的 1/3。忽略这些调整成本,将系统性低估企业实际负担。基于此,本文在量化贸易空间模型中协调机器人技术冲击与调整成本,从技术水平变动和调整成本变动两个维度,系统评估发达经济体机器人应用对中国贸易与福利的影响,并模拟在不同应对策略下的潜在效果。本文的研究结论不仅有助于更精准地衡量发达经济体机器人应用的跨国溢出效应,也为中国制定兼顾产业升级和外部冲击缓释的政策组合提供理论支撑与实践启示。

本文的研究主要与以下几类研究文献密切相关:

(1)在“机器人—劳动力—贸易”这一研究主线下,学术界围绕替代效应与生产率效应形成激烈争论。有研究指出,机器人通过节约成本促使企业用机器取代人工,从而抑制就业(王永钦和董雯, 2020; Acemoglu and Restrepo, 2020);也有研究发现,自动化提升生产率并扩大产能,进而增加非自动化任务的岗位(Graetz and Michaels, 2018; Koch et al., 2021)。Acemoglu and Restrepo(2019)认为,就业净效应取决于这两股力量的相对强弱。收入分配的变化亦呈现两面性:多数证据显示机器人抬高技能工资溢价、扩大收入差距(Acemoglu and Restrepo, 2022; Hémous and Olsen, 2022),但若生产率红利充分传导至劳动者,差距也可能缩小(陈东和秦子洋, 2022; Agrawal et al., 2023)。除了对劳动力市场的影响,机器人应用对贸易的作用也备受关注。现有文献普遍认为,机器人应用通过多种途径影响一国的贸易表现,包括扩大出口规模(Alguacil et al., 2022)、丰富出口产品种类(綦建红和张志彤, 2022)、提升出口产品质量(DeStefano and Timmis, 2024),以及通过成本、创新和资源配置优化等机制提升其在全球价值链中的分工地位(刘斌和潘彤, 2020; 吕越等, 2020; 黄亮雄等, 2023; Fontagné et al., 2024)。

(2)关于发达经济体机器人应用是否存在跨国溢出效应,现有证据尚无定论。Rodrik (2018)指出,发达经济体的机器人应用对发展中国家造成了双重冲击:一方面,削弱了发展中国家在传统劳动密集型产业中的比较优势;另一方面,机器人替代了低技能工人。部分经验研究表明,发达经济体的机器人应用引发“生产回流”(Faber, 2020; 李磊和马欢, 2023)。也有学者提出不同观点。例如, Antràs (2020)认为,发达经济体的工业自动化企业会通过降低成本、提高生产率和扩大生产规模,从而增加来自发展中国家的中间品投入,因此,自动化未必会替代外包或引发全球化逆转。Stemmler (2023)针对巴西的研究表明,发达经济体的机器人使用减少了巴西制造业部门的就业,但增加了原材料部门的就业。此外, Artuc et al. (2019)发现,美国机器人使用并没有对墨西哥就业产生负向影响。综上所述,现有研究表明,发达经济体机器人应用对发展中国家的影响如何,尚未形成一致的研究结论。这些分歧大多源于各国产业结构、要素禀赋及其与发达经济体产业链耦合程度的差异。

(3)机器人应用的福利效应评估研究。尽管现有文献在机器人应用领域取得了丰富成果,但多数实证研究采用简约式估计方法,且主要基于局部均衡视角。这些方法虽然能够揭示机器人应用的局部影响,但难以有效捕捉其在跨国和跨部门间的溢出效应,也无法全面量化其对福利的整体影响。为克服这些局限性,一些学者开始基于量化贸易模型,采用结构估计方法进行量化评估和反事实模拟。其中, Caliendo and Parro (2015)构建的多国多部门一般均衡模型作为基准模型,已被广泛应用。在此基础上,后续研究者对该模型不断拓展,开展了大量关于贸易政策及其他外部冲击对各国贸易和福利影响的量化分析(段玉婉等, 2022; 彭水军和吴腊梅, 2022; Caliendo et al., 2024)。然而,仅有少量文献将机器人纳入量化贸易模型框架中进行分析。基于 Caliendo and Parro (2015)模型框架, Artuc et al. (2023)模拟了北方国家的自动化对南北国家贸易和福利的影响; Galle and Lorentzen (2024)考察了进口冲击和自动化对美国劳动力市场的影响。胡翠和王宁(2024)区分中间品和最终品贸易,反事实模拟了机器人价格下降对全球生产网络的影响。毛海涛等(2024)将福利效应分解为直接效应和间接效应,量化分析了机器人应用对不同国家消费者福利的影响。马欢等(2024)假设机器人使用程度外生给定,反事实模拟了全球生产智能化的贸易和福利效应。

尽管前述研究极大地丰富了学术界对机器人经济影响的理解,并拓展了量化贸易模型的应用边界,但机器人应用在不同经济体和产业间的多维度效应及其福利后果仍有广阔的探索空间,该领域的研究能为政策制定提供更坚实的理论和实证依据。对此,本文的核心研究增量与贡献主要体现在以下三个层面:①在模型构建方面,本文对 Caliendo and Parro (2015)的经典量化贸易框架进行了两项关键拓展,以更贴切地刻画机器人应用的经济现实。一是创新性地引入了机器人要素,并内生化了其价格。不同于以往文献多将机器人价格或使用程度视为外生冲击(Artuc et al., 2023; 胡翠和王宁, 2024; 毛海涛等, 2024; 马欢等, 2024),本文模型设定机器人行业自身的技术进步内生地决定了机器人价格,进而影响其应用决策。尤为重要的是,机器人使用成本远超设备购置本身。因此,本文将机器人的使用成本细分为购买成本与调整成本两部分,并根据理论模型估计了各国的机器人调整成本,力图更准确地捕捉机器人应用的真实经济约束及其效应。二是细分了劳动要素,区分高技能与低技能劳动,并设定机器人主要替代低技能劳动执行可自动化任务,从而增强了模型的现实解释力。②在影响机制探索方面,本文从机器人技术水平和调整成本这两个新的维度,深入剖析了发达经济体机器人应用的复杂跨国溢出效应,揭示了现有文献较少关注的传导路径。理论模型推演及模拟结果显示,发达经济体的机器人技术进步对中国产生双重影响:既通过重塑比较优势带来直接的负面冲击,也通过机器人价格下降、促进中国进口机器人以降低生产成本,从而部分缓

解不利影响。若发达经济体的机器人调整成本下降,则会激励其机器人使用、增强其出口竞争力,这在一定程度上可能削弱中国的相对出口表现,但对中国福利的直接影响有限。这项分析为理解机器人应用的跨国经济互动提供了新的理论视角和更全面的机制解释。③在实证策略与政策含义方面,本文通过结构估计和深入的反事实模拟分析,量化了发达经济体机器人应用对中国贸易与福利的具体影响,并评估了中国的应对策略效果。

在运用简约式方法初步揭示相关贸易特征的基础上,本文构建并估计了包含上述创新要素的量化贸易模型,得以在一般均衡框架下进行更可靠的评估。反事实模拟的核心发现是:为有效应对发达经济体机器人冲击,中国提升自身的机器人技术水平有助于对冲出口下滑和福利受损,而降低国内机器人的调整成本则更能促进高技能劳动者的实际工资增长,同时也加剧了技能溢价。尤为关键的是,同时推进技术升级和降低调整成本的组合性政策,具有最强的综合对冲效果。这些量化结果不仅为中国在自动化浪潮中制定精准的产业与贸易政策提供了重要的实证参考,也为学术界和社会公众理解技术变革的深远全球影响提供了更细致和全面的洞察。

二、特征事实分析

1. 简约式估计和数据来源

为初步揭示发达经济体机器人应用与中国出口之间的特征事实,本文进行简约式估计,旨在考察发达经济体的机器人渗透度如何与中国对这些国家的出口规模相关联。基准回归模型设定如下:

$$\ln Export_DMs_{pt} = \alpha + \beta \ln Robot_{pt}^{DMs} + \gamma Controls_{pt} + \mu_p + \eta_t + \varepsilon_{pt} \quad (1)$$

其中,下标 p 和 t 分别表示省份和年份。 $Export_DMs$ 为各省份向发达经济体的出口额, $Robot^{DMs}$ 为发达经济体机器人使用对各省份的渗透度。 $Controls$ 为控制变量,选择其他可能影响中国向发达经济体出口的因素,包括新兴经济体和中国的机器人渗透度($Robot^{EMs}$ 和 $Robot^{CN}$),以及省份层面的重要影响因素,如产业结构($Structure$)、实际 GDP($\ln GDP$)、货运量($\ln VRF$)、最低工资标准($\ln Wage$)、互联网用户数($\ln LAN$)等。此外,还加入了省份固定效应(μ_p)和年份固定效应(η_t),分别控制不随个体和时间变化的不可观测因素。本文选择以下 14 个发达经济体作为研究对象:奥地利、比利时、德国、法国、韩国、荷兰、美国、葡萄牙、日本、瑞士、西班牙、新加坡、意大利和英国。

考虑到模型中可能存在互为因果的内生性问题,如发达经济体在“生产回流”过程中可能会进一步推动机器人使用的增加,以及遗漏变量问题,本文采用工具变量法(IV)进行估计,以缓解内生性带来的影响。①

机器人数据来源于 IFR 数据库。2009—2016 年的出口数据根据中国海关企业库汇总,2017—2019 年的出口数据来自中华人民共和国海关总署网站。2004 年的就业数据依据第一次全国经济普查结果获取,其中,汽车制造业的就业人数,结合 2004 年中国工业企业数据库的数据按比例进行估算。投入产出数据来自 OECD-ICIO 数据库。产业结构、实际 GDP、货运量、互联网用户数等指标,数据取自相关年份《中国统计年鉴》。此外,最低工资标准的数据则来自 CNRDS 数据库。本文以 2009—2019 年中国 30 个省份(不含西藏、港澳台地区)的省级面板数据为研究样本。

2. 基准回归结果

表 1 呈现了在控制中国以及新兴经济体的机器人渗透度后,发达经济体机器人应用对中国出

① 机器人渗透度及工具变量的构造参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

口贸易规模影响的基准回归结果。第(1)一(3)列展示了普通最小二乘法(OLS)的估计,在依次纳入省份固定效应、年份固定效应以及省份层面控制变量后,核心解释变量 $\ln Robot^{DMs}$ 的系数在所有设定中均显著为负。这初步表明,发达经济体机器人渗透度的提高与中国对这些国家出口规模的减少存在显著的负相关关系。为缓解内生性问题,本文进一步采用前文定义的工具变量,并运用两阶段最小二乘法(2SLS)进行估计,结果报告于第(4)列。K-P LM 和 K-P F 统计量的检验结果显示,模型中不存在弱工具变量问题^①。2SLS 估计的影响效应大于 OLS,这可能与 2SLS 估计反映了局部平均处理效应有关,但其估计系数仍然在 1% 的统计水平上显著为负。综合看,发达经济体机器人应用对中国向其出口的规模产生了显著的抑制作用。这一发现为发达经济体机器人使用可能引致“生产回流”效应,进而减少从中国进口提供了初步的实证支持。

表 1 基准回归:发达经济体机器人应用对中国出口贸易的影响

	(1)	(2)	(3)	(4)
	因变量:向发达经济体的出口规模			
$\ln Robot^{DMs}$	-3.2230*** (0.8390)	-3.0979** (1.5476)	-3.1921** (1.2969)	-6.9831*** (2.2432)
K-P LM stat				14.6570
K-P F stat				10.0010
控制变量	否	否	是	是
年份固定效应	否	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
估计方法	OLS	OLS	OLS	2SLS
观测值	330	330	330	330
R ²	0.9279	0.9306	0.9417	0.9291

注: *、**和***分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著;括号内为回归系数的稳健标准误。以下各表同。

3. 稳健性检验

为提高结论的可信度,本文对基准结果进行了稳健性检验:使用聚类稳健标准误;控制中美贸易摩擦的潜在影响;控制产业转移的潜在影响;控制外部需求冲击的潜在影响。以上稳健性检验结果与基准结果保持一致。^②

4. 机制分析:基于贸易类型的进一步考察

为了深入验证机器人应用是否推动了发达经济体的“生产回流”现象,本文基于 BEC 商品分类标准,将贸易产品划分为简单中间品、复杂中间品、资本品和消费品,并分别检验发达经济体机器人使用对中国向其出口各类产品的具体影响,相关实证结果如表 2 第(1)一(4)列所示。结果表明,发达经济体机器人使用降低了中国向其出口的资本品和消费品等最终产品规模,但对中间品出口的影响呈现明显的异质性特征,即发达经济体从中国进口的简单中间品显著增加。该发现与 Antràs (2020)、Stemmler (2023) 的结论相似,进一步印证了机器人应用对国际贸易产生的深远影响。

这种复杂的贸易效应可能主要源自两个机制:一是成本节约效应。发达经济体的劳动成本显

① 工具变量法须同时满足外生性与相关性两项要求。其中,外生性难以直接检验,为评估结果的稳健性,本文借鉴 Conley et al. (2012) 的容忍度分析,测算工具变量在何种程度偏离外生性假设才会推翻结论。结果显示,只有当工具变量对被解释变量的直接影响达到 -5.88,即约为核心解释变量估计系数的 1.5 倍,本文的结论才会失效,表明估计结果对潜在外生性偏差具有较强的稳健性。

② 稳健性检验结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

表 2 机制检验: 基于贸易类型的进一步考察

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	简单中间品	复杂中间品	资本品	消费品	加工贸易	一般贸易
$\ln Robot^{DMs}$	7.9583** (3.2916)	-0.6704 (1.9105)	-21.3161*** (4.6732)	-5.9854*** (2.1367)	-9.2212** (3.7468)	-1.5531 (1.3222)
K-P LM stat	14.6570	14.6570	14.6570	14.6570	14.6570	14.6570
K-P F stat	10.0010	10.0010	10.0010	10.0010	10.0010	10.0010
观测值	330	330	330	330	330	330
R ²	0.6950	0.9182	0.8525	0.9077	0.9311	0.9461

注: 回归中控制了中国和新兴经济体的机器人渗透度、省份和年份固定效应以及控制变量。

著高于中国,“机器换人”使其生产成本大幅降低,削弱了中国在最终产品出口中的价格竞争优势,降低了发达经济体对中国最终品的进口需求。二是规模扩张效应。随着机器人应用程度不断提高,发达经济体不仅生产成本降低,还扩大了整体生产规模,这种规模扩张必然增加对原材料和中间品的需求,从而推动中国对这些国家的简单中间品出口增加。这与 Stemmler (2023) 针对巴西的研究相似,国外自动化技术冲击减少了巴西制造业出口,却促进了原材料出口;同样, Cilekoglu et al. (2024) 也发现,西班牙企业在部署机器人后,从中低收入国家进口的中间品明显增加。这些结论共同揭示出机器人技术在全球价值链分工中所发挥的复杂且多维的作用机制。

发达经济体机器人技术应用对中国出口贸易产生的不利影响主要体现为,当机器人价格降低时,这些国家倾向于加大对机器人的使用力度,从而减少外包或离岸生产活动,这直接削弱了中国加工贸易的竞争优势。如果发达经济体确实存在显著的“生产回流”现象,那么这一变化必然在中国加工贸易数据中有所体现。为进一步验证加工贸易是否构成发达经济体机器人应用影响中国出口的中间传导渠道,本文分别以中国对发达经济体的加工贸易出口和一般贸易出口作为被解释变量,回归分析发达经济体的机器人渗透度对这两种不同类型贸易的影响,估计结果如表 2 第(5)、(6)列所示。结果显示,发达经济体的机器人应用降低了中国向其出口的加工贸易规模,但对一般贸易出口的影响则未表现出显著性。具体而言,在本文样本中,资本品和消费品出口中加工贸易的比重分别达到 56.07% 和 28.55%。发达经济体机器人使用对加工贸易的负面影响尤其明显,这进一步导致中国对这些国家的资本品和消费品出口规模下降,与前述分析结果相吻合。

三、理论模型

1. 模型设定

假设世界由 N 个国家(或地区)、 J 个行业组成,用下标 n 或 i 表示国家,上标 j 或 k 表示行业。本文假定各国的劳动力总量为外生给定,即劳动力的总供给不受模型内部其他因素的影响。同时,各国内部劳动力可以在不同产业部门之间自由流动,但跨国之间的劳动力流动受到严格限制。此外,模型假设产品市场和要素市场均为完全竞争市场结构。

(1) 消费者行为。假设国家 n 的代表性消费者的效用函数如下:

$$U(C_n) = \prod_{j=1}^J (C_n^j)^{\alpha_n^j} \quad (2)$$

其中, C_n^j 是 n 国的居民对 j 行业的消费量;参数 α_n^j 表示支出份额,且 $\sum_{j=1}^J \alpha_n^j = 1$ 。

(2)中间品生产。令 $\omega^j \in [0, 1]$ 表示连续商品种类,其生产需要使用劳动力、复合任务和中间投入品 3 种要素。假设 n 国 j 行业商品种类 ω^j 的生产函数为 Cobb-Douglas 形式:

$$q_n^j(\omega^j) = z_n^j(\omega^j)(H_n^j(\omega^j))^{\gamma_{Hn}^j}(T_n^j(\omega^j))^{\gamma_{Tn}^j} \prod_{k=1}^J (M_n^{kj}(\omega^j))^{\gamma_{kn}^j} \quad (3)$$

其中, $z_n^j(\omega^j)$ 代表生产率,是一个随机变量,来自 Frechet 的独立同分布,其累积分布函数为 $F_n^j(z) = \exp(-\lambda_n^j z^{-\theta^j})$,参数 λ_n^j 代表 n 国 j 行业的平均技术水平,参数 θ^j 刻画行业生产率的离散程度。 $H_n^j(\omega^j)$ 表示 n 国 j 行业生产商品种类 ω^j 所需的高技能劳动力, $T_n^j(\omega^j)$ 是由机器人和低技能劳动力组成的复合任务, $M_n^{kj}(\omega^j)$ 表示来自 k 行业的复合中间品。参数 γ_{Hn}^j 和 γ_{Tn}^j 分别表示高技能劳动力和复合任务的份额,参数 γ_{kn}^j 则表示在 n 国 j 行业生产商品种类 ω^j 的总成本中来自 k 行业的中间品的份额。假设生产商品种类 ω^j 的规模报酬不变,则 $\gamma_{Hn}^j + \gamma_{Tn}^j + \sum_{k=1}^J \gamma_{kn}^j = 1$ 。

在规模报酬不变和完全竞争市场的假定下, n 国 j 行业生产商品种类 ω^j 的生产成本为 $c_n^j/z_n^j(\omega^j)$, c_n^j 表示如下:

$$c_n^j = r_n^j (w_{Hn})^{\gamma_{Hn}^j} (w_{Tn})^{\gamma_{Tn}^j} \prod_{k=1}^J (P_n^k)^{\gamma_{kn}^j} \quad (4)$$

其中, r_n^j 为常数, w_{Hn} 、 w_{Tn} 和 P_n^k 分别是高技能劳动力、复合任务和中间品的价格。

(3)复合中间品生产。假设 n 国 j 行业复合中间品 Q_n^j 的生产函数采用 Dixit-Stiglitz 加总形式:

$$Q_n^j = \left[\int r_n^j(\omega^j)^{1-1/\sigma^j} d\omega^j \right]^{\sigma^j/(\sigma^j-1)} \quad (5)$$

上式中, $r_n^j(\omega^j) = (p_n^j(\omega^j)/P_n^j)^{-\sigma^j} Q_n^j$ 是从成本最低的国家购买的商品种类 ω_n^j 的投入量,其价格表示为 $p_n^j(\omega^j) = \min_m [c_m^k \kappa_{mn}^j / z_m^j(\omega^j)]$, 其中, $\kappa_{mn}^j = d_{mn}^j (1 + \tau_{mn}^j)$, κ_{mn}^j 表示 m 国出口到 n 国的贸易成本,由冰山成本 d_{mn}^j 和关税 τ_{mn}^j 构成。复合中间品 Q_n^j 既可以作为最终品被居民消费(C_n^j),也可以作为其他部门的中间品投入($M_n^{kj}(\omega^j)$)。

在 $z_m^j(\omega^j)$ 服从 Frechet 分布的假设下, n 国 j 行业的价格指数可以表示为:

$$P_n^j = A^j \left[\sum_{i=1}^N \lambda_i^j (c_i^j \kappa_{ni}^j)^{-\theta^j} \right]^{-\frac{1}{\theta^j}} \quad (6)$$

其中, A^j 是一个常数; λ_i^j 表示 i 国 j 行业的平均生产率水平,该参数的变化反映生产技术的变动。因此,一个国家行业层面的价格水平同时受到本国以及进口贸易伙伴技术水平的共同影响。 θ^j 刻画不同国家在 j 行业的技术差异,该参数的数值越小,说明国家间的技术差距越大。本文进一步假设,当一国机器人行业的技术水平 λ_i^R 提升后,一方面会直接降低该国机器人行业的价格水平 P_n^R ,进而通过降低所有行业的生产成本来改善本国产品的相对价格优势,最终影响国际贸易流向与各国福利水平;另一方面,在开放贸易的情形下,机器人行业价格的下降也将促使其他国家增加对该国机器人的进口,从而间接提高进口国的机器人使用程度和降低生产成本。这种间接影响可以理解为发达经济体机器人技术进步对进口国产生的技术溢出效应,这在一定程度上减缓了其他国家因机器人技术进步所面临的不利冲击。

在居民的效用函数设定为 Cobb-Douglas 形式下,消费者价格指数可以表示为:

$$P_n = \prod_{j=1}^J (P_n^j / \alpha_n^j)^{\alpha_n^j} \quad (7)$$

(4) 机器人应用。借鉴 Acemoglu and Restrepo (2019) 的设定, 假设复合任务 T_n^j 的生产函数为:

$$T_n^j = \left[\int_0^1 t_n^j(v)^{\frac{\rho-1}{\rho}} dv \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (8)$$

其中, $t_n^j(v)$ 表示第 v 种任务的产出; ρ 是不同任务之间的替代弹性, $\rho < 1$ 。对于自动化任务, 由机器人以自动化的方式完成, 对于不可自动化的任务, 由低技能劳动以非自动化的方式完成。假设对于任务 v , 机器人和低技能劳动力的效率分别为 $\phi_R(v)$ 和 $\phi_L(v)$, 机器人和低技能劳动力的数量分别为 $R_n^j(v)$ 和 $L_n^j(v)$ 。同时, 自动化任务的份额为 δ_n , $t_n^j(v)$ 的生产函数设定为:

$$t_n^j(v) = \begin{cases} \phi_R(v) R_n^j(v), & v \leq \delta_n \\ \phi_L(v) L_n^j(v), & v > \delta_n \end{cases} \quad (9)$$

参考 Guerreiro et al. (2022) 的研究探讨, 可以得到复合任务 T_n^j 的生产函数为^①:

$$T_n^j = \left[(R_n^j)^\eta + (L_n^j)^\eta \right]^{1/\eta} \quad (10)$$

根据最优化条件, 可得复合任务的价格为:

$$w_{Tn} = \left[(\delta_n)^\eta w_{Rn}^{-\eta} + (1 - \delta_n)^\eta w_{Ln}^{-\eta} \right]^{-\frac{1}{\eta}} \quad (11)$$

其中, w_{Ln} 为低技能劳动力的名义工资; w_{Rn} 为机器人使用成本, 由租金价格 $P_n^R \varpi$ 和调整成本 $P_n^R \varpi \varphi_n$ 两部分构成, 即 $w_{Rn} = P_n^R \varpi (1 + \varphi_n)$; P_n^R 为机器人购买价格, 由机器人行业价格水平确定; ϖ 为折旧率; 租金价格等于机器人购买价格乘以折旧率; φ_n 为机器人调整成本比例。机器人与低技能劳动之间的替代弹性定义为 $1/(1 - \eta)$, 且满足条件 $\eta \in (0, 1]$ 。

(5) 支出份额。根据 Frechet 分布的性质, 推导出 n 国 j 行业对 i 国产品的支出份额为:

$$\pi_{ni}^j = \frac{\lambda_i^j (c_i^j \kappa_{ni}^j)^{-\theta}}{\sum_{h=1}^N \lambda_h^j (c_h^j \kappa_{nh}^j)^{-\theta}} \quad (12)$$

(6) 市场出清和贸易收支。要素市场出清的条件分别为:

$$w_{Hn} H_n = \sum_{j=1}^J \gamma_{Hn}^j \sum_{i=1}^N X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j} \quad (13)$$

$$w_{Ln} L_n = \sum_{j=1}^J (1 - \delta_n) \gamma_{Ln}^j \sum_{i=1}^N X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j} \quad (14)$$

$$w_{Rn} R_n = \sum_{j=1}^J \delta_n \gamma_{Rn}^j \sum_{i=1}^N X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j} \quad (15)$$

产品市场出清要求 n 国 j 行业的总支出与总收入相等, 总支出可表示为:

$$X_n^j = \sum_{k=1}^J \gamma_{nk}^j \sum_{i=1}^N X_i^k \frac{\pi_{in}^k}{1 + \tau_{in}^k} + \alpha_n^j I_n \quad (16)$$

国家层面的贸易收支条件为:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N X_n^j \frac{\pi_{ni}^j}{1 + \tau_{ni}^j} - D_n = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j} \quad (17)$$

其中, X_n^j 为 n 国 j 行业总支出, 居民总收入 $I_n = w_{Hn} H_n + w_{Ln} L_n + w_{Rn} R_n + TR_n + D_n$, 关税收入 $TR_n = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \tau_{ni}^j M_{ni}^j$, 国家层面的赤字 $D_n = \sum_{k=1}^J D_n^k$, 各国分行业的赤字 $D_n^j = \sum_{i=1}^N M_{ni}^j - \sum_{i=1}^N E_{ni}^j$, 各国分行业

① 具体推导过程参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

的出口 $E_{ni}^j = X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j}$, 各国分行业的进口 $M_{ni}^j = X_n^j \frac{\pi_{ni}^j}{1 + \tau_{ni}^j}$ 。

2. 模型求解

上述(4)式、(6)式、(12)式—(17)式构成了模型的均衡条件,在给定外生参数后,可求出工资、价格、支出份额等内生变量的均衡解。为了避免估计大量的参数,本文借鉴 Dekle et al. (2007)的精确帽子方法(Exact-hat Algebra),根据变量的相对变化求解模型均衡。^①

3. 技能溢价和福利效应及其分解^②

(1)技能溢价及其分解。本文将技能溢价定义为高技能劳动相对于低技能劳动的工资比率,基于上述均衡条件的相对变化形式,借助一阶泰勒展开,将技能溢价的变化分解为贸易效应、产业关联效应和机器人效应三个部分,以便更加清晰地揭示各因素对技能溢价的影响机制:

$$\ln \frac{\hat{w}_{Hn}}{\hat{w}_{Ln}} = \underbrace{-\sum_{j=1}^J \frac{\alpha_n^j}{\theta^j \gamma_{Hn}^j} \ln \hat{\pi}_{nn}^j}_{\text{贸易效应}} - \underbrace{\sum_{j=1}^J \frac{\alpha_n^j}{\gamma_{Hn}^j} \ln \prod_{k=1}^J \left(\frac{\hat{P}_n^k}{\hat{P}_n^j} \right)^{\gamma_n^k}}_{\text{产业关联效应}} + \underbrace{\sum_{j=1}^J \alpha_n^j \left[\frac{1}{\theta^j \gamma_{Hn}^j} \ln \hat{\lambda}_n^j + \frac{(1 - \delta_n) \gamma_{Tn}^j + \gamma_{Hn}^j}{\vartheta (1 - \delta_n) \gamma_{Hn}^j} \ln \hat{\delta}_n - \frac{\gamma_{Tn}^j + \gamma_{Hn}^j}{\gamma_{Hn}^j} \ln \frac{\hat{w}_{Rn}}{\hat{P}_n^j} \right]}_{\text{机器人效应}} \quad (18)$$

根据(18)式,技能溢价的变化不仅受到贸易效应与产业关联效应的影响,还与机器人效应密切相关。机器人效应分为3个部分:第一项是技术效应,即机器人技术水平提高带来的直接影响;第二项为负,机器人技术进步会降低其价格 $\hat{w}_{Rn}$,提高自动化任务份额 $\hat{\delta}_n$;第三项为正。机器人影响的方向取决于上述3种效应的相对强弱。

(2)福利效应及其分解。本文的消费者福利用实际收入衡量,即名义收入与消费者价格指数之比 $W_n = I_n / P_n$ 。名义收入除了工资外,还包括关税收入等。根据 Caliendo and Parro (2015)的方法,可将福利分解为贸易条件效应、贸易量效应和机器人效应三部分:

$$\begin{aligned} \text{dln } W_n = & \underbrace{\frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (E_{ni}^j \text{dln } c_n^j - M_{ni}^j \text{dln } c_i^j)}_{\text{贸易条件效应}} + \underbrace{\frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \tau_{ni}^j M_{ni}^j (\text{dln } M_{ni}^j - \text{dln } c_i^j)}_{\text{贸易量效应}} \\ & + \underbrace{\frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \frac{\delta_n \gamma_{Tn}^j}{\eta} E_{ni}^j \text{dln} \left(\frac{\delta_n}{1 - \delta_n} \right) + \frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \frac{1}{\theta^j} (1 + \tau_{ni}^j) M_{ni}^j \text{dln } \lambda_i^j}_{\text{机器人效应}} \end{aligned} \quad (19)$$

上式中,贸易条件效应为负,贸易量效应和机器人效应为正。贸易条件效应和贸易量效应衡量机器人对福利的间接影响,机器人应用会降低本国产品的出口相对价格,导致贸易条件恶化。机器人效应刻画机器人技术变化和自动化份额变化通过生产率效应对福利产生的直接影响。

四、数据与模型参数校准

1. 数据来源^③

本文模型均衡求解及反事实模拟所依赖的经济数据主要来源于以下数据库:IFR 数据库、

① 相对变化形式下的模型均衡条件参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 技能溢价和福利分解的详细推导过程参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

③ 数据来源的详细介绍参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

OECD-ICIO 数据库、国际劳工组织(ILO)数据库、世界贸易整合解决方案(WITS)数据库、联合国商品贸易统计数据库(UN COMTRADE)。本文以 2009 年为基期, 综合利用上述数据对模型中的相关参数进行校准。

2. 机器人技术水平的估计^①

鉴于各国的官方统计机构针对机器人行业的核算数据相对匮乏, 部分文献基于机器设备制造行业来测算自动化水平(Galle and Lorentzen, 2024), 本文遵循这一做法。此外, 在实际估计机器人行业技术水平时, 为了扩大样本容量、提升估计精度, 本文首先对所有行业的技术水平进行估算, 再提取机器人行业的相关估计结果用于分析。具体测算过程参照 Levchenko and Zhang(2016)以及杨曦和徐扬(2022)的方法, 采用以下步骤测算机器人行业的技术水平。

根据(12)式, 可以得到:

$$\frac{\pi_{ni}^j}{\pi_{nn}^j} = \frac{\lambda_i^j (c_i^j \kappa_{ni}^j)^{-\theta}}{\lambda_n^j (c_n^j)^{-\theta}} \quad (20)$$

对(20)式两边取对数, 则有:

$$\ln\left(\frac{\pi_{ni}^j}{\pi_{nn}^j}\right) = \ln(\lambda_i^j (c_i^j)^{-\theta}) - \ln(\lambda_n^j (c_n^j)^{-\theta}) - \theta^j \ln(\kappa_{ni}^j) \quad (21)$$

其中, κ_{ni}^j 与两国距离(*Dist*)、是否为邻国(*Contig*)、是否有共同语言(*Comlang*)、是否存在殖民地关联(*Colony*), 以及出口国特定的贸易成本(d_i^j)有关。因此, 本文得到如下回归方程:

$$\ln\left(\frac{\pi_{ni}^j}{\pi_{nn}^j}\right) = S_i^j - S_n^j - \theta^j \beta_1^j \ln Dist_{ni} - \theta^j \beta_2^j \ln Contig_{ni} - \theta^j \beta_3^j \ln Comlang_{ni} - \theta^j \beta_4^j \ln Colony_{ni} + \varepsilon_{ni}^j \quad (22)$$

其中, $S_i^j = \ln(\lambda_i^j (c_i^j d_i^j)^{-\theta})$, $S_n^j = \ln(\lambda_n^j (c_n^j)^{-\theta})$, ε_{ni}^j 为随机干扰项。

由(22)式得到出口国和进口国的固定效应估计值 $\bar{S}_i^j$ 和 $\bar{S}_n^j$ 后, 根据 Tombe and Zhu (2019) 的研究, 按照如下公式得到贸易成本(d_i^j):

$$d_i^j = \exp\left(\frac{\bar{S}_i^j - \bar{S}_n^j}{-\theta^j}\right) \quad (23)$$

令 $\bar{\lambda}_i^j = \lambda_i^j (c_i^j)^{-\theta}$, 根据 S_i^j 和 d_i^j 的表达式, 则有:

$$\ln \bar{\lambda}_i^j = S_i^j + \theta^j \ln d_i^j = S_n^j \quad (24)$$

上式表明, 估计出 $\bar{S}_n^j$ 后即得到 $\ln \bar{\lambda}_i^j$ 的估计值。 $\bar{\lambda}_i^j$ 由技术水平(λ_i^j)和生产成本(c_i^j)构成, 接下来只需要根据(4)式计算出 c_i^j 就可以估计出技术水平(λ_i^j)。其中, 工资 w_{Hn} 、 w_{Tn} , 参数 γ_{Hn}^j 、 γ_{Tn}^j 可根据 ILO、UN COMTRADE、OECD-ICIO 等数据库计算得到, 价格指数则根据(6)式和(12)式由如下公式给出:

$$P_n^k = A^k \left[\exp(-\bar{S}_n^k / \theta^k) \right] \times (\pi_{nn}^k)^{1/\theta^k} \quad (25)$$

3. 机器人调整成本的估计^②

根据要素市场出清条件, 即(13)式—(15)式, 则有: $w_{Hn} H_n^j + w_{Ln} L_n^j + w_{Rn} R_n^j = VA_n^j$, 其中, VA_n^j 是 n 国 j 行业的增加值。再结合 $w_{Rn} = P_n^R \varpi (1 + \varphi_n)$, 可以得到机器人调整成本的表达式为:

① 需要注意的是, 由于本文采用机器设备制造行业的数据测算机器人技术水平, 因此, 发达经济体机器人技术进步对中国产生的影响可能被高估。机器人技术水平的测算结果及分析具体参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 机器人调整成本的测算结果及分析具体参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

$$\frac{VA_n^j - w_{Hn}H_n^j - w_{Ln}L_n^j}{\varpi P_n^R R_n^i} - 1 = \varphi_n \quad (26)$$

对(26)式取对数即可得到机器人调整成本的估计方程:

$$\ln\left(\frac{VA_n^j - w_{Hn}H_n^j - w_{Ln}L_n^j}{\varpi P_n^R R_n^i} - 1\right) = \ln\varphi_n + \varepsilon_n^j \quad (27)$$

根据(27)式,各国的机器人调整成本可以由国家固定效应估计得到。

4. 其他参数校准^①

本文需要校准的参数还包括:中间投入系数(γ_{In}^j)、消费支出份额(α_n^j)、贸易份额(π_{ni}^j)、高技能劳动的增加值份额(γ_{Hn}^j)、复合任务的增加值份额(γ_{Tn}^j)、贸易赤字(D_n)、贸易弹性(θ)以及机器人与低技能劳动力的替代弹性($1/(1 - \eta)$)等。

五、量化结果分析

在理论模型的基础上,本文从技术水平与调整成本两个维度刻画机器人应用,结合2009—2019年全球机器人技术进步与调整成本变动的实际数据,具体设计了以下三种情形,以全面评估发达经济体机器人应用对中国贸易与福利的影响:存在机器人进口渠道的情况下,考察仅发达经济体机器人技术水平变化产生的影响;关闭机器人进口渠道的情况下,分析仅由发达经济体机器人技术变化所带来的影响;单独考察发达经济体机器人调整成本变化的效应。通过上述设定,本文旨在揭示机器人技术进步与调整成本变化在重塑全球贸易与分工格局中的不同作用路径。

1. 贸易效应分析

(1)区分对发达经济体和其他国家的影响。发达经济体机器人使用程度的提升,不仅直接增强了其出口商品的相对成本优势,降低了中国对发达经济体的出口规模,同时通过改变中国与发达经济体之间的相对优势,促使其他国家的进口需求从中国转向机器人赋能下的发达经济体产品。

表3分别展示了仅考虑发达经济体机器人技术水平变化和仅考虑发达经济体机器人调整成本变化时,发达经济体使用机器人对中国出口规模的影响。在机器人技术水平变化的情形下,如果允许存在机器人进口渠道,结果显示,发达经济体机器人技术进步使中国的总体出口下降0.6115%,其中,对发达经济体的出口反而增加0.3191%,而对其他国家的出口下降1.6898%。发达经济体的机器人技术冲击通过三种机制综合影响中国出口:①增强本国比较优势。机器人技术进步促使发达经济体广泛应用机器人进行生产,从而提升本国产品在国际市场的竞争力。②规模扩张效应。自动化带动了企业生产率提升,进而扩大生产规模,由此增加了对中间品的需求,这一需求扩张有利于中国的中间品出口(Antràs, 2020)。③技术溢出效应。若存在国际贸易渠道,发达经济体机器人价格下降将刺激中国企业进口机器人设备,进而通过技术溢出提升自身的生产率与出口竞争力。为检验技术溢出效应是否存在,本文进一步设定了关闭机器人进口渠道的情形。结果表明,在切断机器人进口渠道后,中国对发达经济体的出口下降了0.5079%。这一结果明确表明,发达经济体机器人技术进步确实通过进口渠道对中国产生了技术溢出效应,部分抵消了机器人应用所带来的直接出口冲击。

① 其他参数校准的过程参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

表 3	发达经济体机器人应用对中国出口的影响		单位: %
	技术水平实际变化		调整成本实际变化
	存在机器人进口渠道	关闭机器人进口渠道	
总出口增长	-0.6115	-0.7028	-0.1624
其中:向发达经济体	0.3191	-0.5079	-0.1516
向其他国家	-1.6898	-0.9300	-0.1749

在发达经济体机器人调整成本变化的影响方面,表3的模拟结果显示,发达经济体机器人调整成本的变化阻碍了中国出口,总出口规模下降了0.1624%。理论上,机器人调整成本下降会降低使用成本,鼓励企业加大机器人应用力度,进而提升本国产品的国际竞争力和出口规模。本文基于数据测算发现,2009—2019年,发达经济体机器人调整成本平均下降约11%,在一定程度上促进了机器人应用,增强了其生产成本优势。因此,与机器人技术进步产生的出口冲击类似,发达经济体调整成本的下降同样对中国出口产生了负向影响。

(2)区分对中间品出口和最终品出口的影响。在跨国生产体系下,中间品贸易与最终品贸易共同构成国际贸易的核心内容。机器人技术既可用于原材料、零部件等中间品的生产过程,也可用于最终产品的制造、加工与组装环节,在降低生产成本、提升产品附加值和出口竞争力方面发挥关键作用。表4展示了在不同情形下,发达经济体机器人应用对中国中间品和最终品出口的影响。

表 4 发达经济体机器人应用对中国中间品出口和最终品出口的影响			单位: %
	技术水平实际变化		调整成本实际变化
	存在机器人进口渠道	关闭机器人进口渠道	
中间品出口增长	-0.5403	-0.8517	-0.1778
其中:向发达经济体	1.0225	-0.0181	-0.1642
最终品出口增长	-1.1496	-0.7601	-0.1607
其中:向发达经济体	5.1174	-0.5536	-0.1913

从表4的结果可以看出,相比之下,发达经济体机器人技术进步对中国中间品与最终品出口的影响呈现明显的异质性特征。就中间品出口而言,尽管中国的中间品总出口出现下降趋势,但在间接效应作用下,降幅有所收窄,且中国对发达经济体的中间品出口增速由负转正。这表明,发达经济体机器人技术提升虽然在一定程度上压低了生产成本,但同时通过扩大生产规模增加对中间品的需求,进而提升对中国中间产品的进口需求。该结果与 Artuc et al.(2023)的研究结论一致,即发达经济体机器人应用提高生产效率、扩大生产规模,从而促进了对发展中国家中间品的进口需求。

在最终品出口方面,当关闭机器人进口渠道时,中国向发达经济体的最终品出口下降;而在允许机器人进口的情形下,中国对发达经济体的最终品出口实现增长。这表明,从静态角度看,发达经济体机器人应用确实削弱了中国在最终品出口上的传统比较优势,但从动态角度看,中国通过进口发达经济体机器人,吸收先进技术,在超大规模市场和完整产业链体系的支撑下,大幅降低了自身的生产成本,进而增强最终产品的国际竞争力。整体而言,机器人进口不仅有助于缓解发达经济体技术冲击对中国出口的负面影响,还在一定条件下促进中国在全球价值链分工中的竞争力提升。

2.福利效应分析

(1)实际工资及技能溢价变化。从表5可以发现,发达经济体机器人技术进步总体上提高了中国的实际工资水平,尤其对高技能劳动的影响更为明显,增加了技能溢价。此外,对比存在和关闭机器人进口渠道的影响发现,机器人进口不仅显著提高中国的实际工资水平,而且加剧了技能溢价。表5的结果还显示,发达经济体机器人的调整成本变化对中国实际工资的影响较小,其原因可能是,发达经济体的机器人调整成本变化幅度不大,从而对中国的影响较小。值得注意的是,中国高技能劳动者的实际工资提高,低技能劳动者的实际工资下降,造成技能溢价。上述结果表明,机器人技术进步带来发达经济体的生产效率提升、规模扩大,对中国的中间品进口需求增加。不同于最终品,中间品的生产更多需要高技能工人完成,这进一步提高了中国高技能劳动的工资。

表5 发达经济体机器人应用对中国实际工资和技能溢价的影响 单位:%

	技术水平实际变化		调整成本实际变化
	存在机器人进口渠道	关闭机器人进口渠道	
高技能劳动实际工资	0.1440	0.0222	0.0014
低技能劳动实际工资	0.1135	-0.0005	-0.0005
技能溢价	0.0305	0.0227	0.0020

(2)福利效应及其分解。表6显示,总体上发达经济体机器人技术水平的提升导致中国福利水平下降,其中贸易条件恶化是主要原因。^①一方面,随着发达经济体自动化程度的提高,其出口产品价格显著下降,进而挤压中国在全球市场上的贸易份额,导致中国出口下降。出口需求的收缩引发了出口价格的下滑,降幅甚至超过了发达经济体出口价格的下降幅度,从而恶化中国的贸易条件(毛海涛等,2024)。另一方面,发达经济体机器人技术进步带来机器人价格下降,中国通过机器人进口渠道提升自动化水平,降低生产成本和出口价格,导致贸易条件进一步恶化,福利受损。

表6 发达经济体机器人应用对中国福利的影响 单位:%

	技术水平实际变化		调整成本实际变化
	存在机器人进口渠道	关闭机器人进口渠道	
总福利变化	0.3264	-0.0217	-0.0062
贸易条件效应	-0.1090	-0.0270	-0.0073
贸易量效应	0.0083	0.0053	0.0011
机器人效应	0.4270	0.0000	0.0000

在发达经济体机器人调整成本变化的影响方面,尽管其对中国福利水平产生了负向作用,但整体效果较为有限。具体看,贸易条件效应下降0.0073%,而贸易量效应略微提高0.0011%。该结果表明,发达经济体机器人调整成本的下降主要通过恶化中国的贸易条件来降低其福利水平。

① 需要说明的是,尽管存在机器人进口渠道时,中国的福利水平有所提高,但这主要来自机器设备制造行业,其他行业的福利水平变化大部分为负。如果剔除机器设备制造行业,总福利减少0.1373%。行业层面福利效应的模拟结果具体参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

六、扩展性分析

前文主要通过量化分析,系统考察了发达经济体机器人应用对中国贸易与福利的影响。然而,近年来机器人技术在中国也得到快速推广,这一趋势可能在一定程度上缓解或对冲来自发达经济体的负面冲击。因此,有必要进一步量化评估不同政策措施在应对潜在冲击时的实际效果。为确保可比性,本部分延续前述模拟分析的设定,重点探讨以下三种情形:分析中国自身机器人技术进步对贸易与福利的影响;评估中国机器人调整成本下降对贸易与福利的作用;考察中国机器人技术进步且调整成本下降时,对贸易与福利的综合影响。

1. 中国提高机器人技术水平

机器人的技术水平是决定其生产成本、价格、质量、性能与生产效率的核心因素,尤其在关键零部件的研发与制造环节,技术水平更是起到决定性作用。为模拟中国机器人技术进步的潜在影响,本文基于存在和关闭机器人进口渠道两种情形,假设中国的机器人调整成本保持不变,考察当中国机器人技术水平分别提高10%、20%、50%和100%时,对冲发达经济体机器人应用带来冲击的效果。具体量化模拟结果见图1。

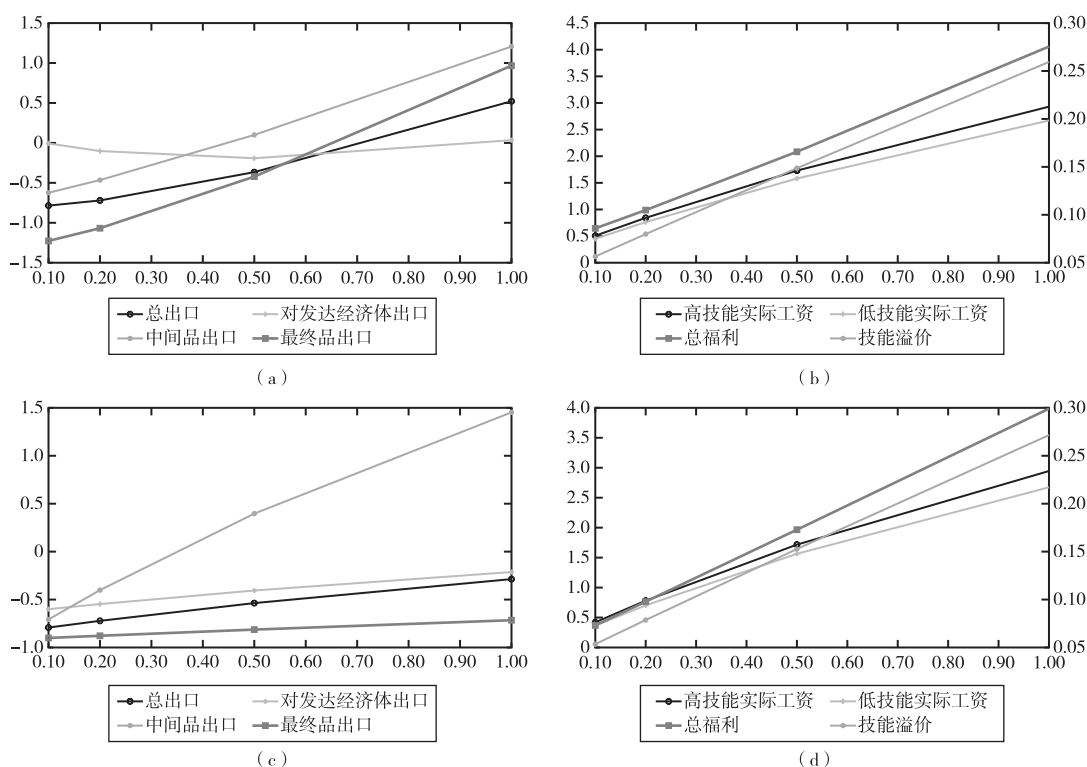


图1 中国提高机器人技术水平对中国贸易和福利的反事实模拟结果

注:图(a)和图(b)分别表示在不关闭机器人进口渠道下,中国提升机器人技术水平10%、20%、50%、100%对中国出口和福利的影响;图(c)和图(d)分别表示在关闭机器人进口渠道下,中国提升机器人技术水平对中国出口和福利的影响。此外,图(b)和图(d)均为双坐标图,左轴表示高、低技能劳动力的实际工资以及总福利变化,右轴表示技能溢价变化。以下各图同。

模拟结果表明,中国机器人技术水平提升能够在一定程度上对冲发达经济体自动化带来的不利影响,且在允许机器人进口的情形下,对冲效果更加明显。随着中国机器人技术水平的持续提升,中国的贸易和福利水平均呈现出逐步改善的趋势。具体而言,在关闭机器人进口渠道的设定下,当中国机器人技术水平提高10%至100%时,总出口的降幅从0.7920%收窄至0.2867%,技能溢价由增长0.0535%扩大至0.2715%,福利水平的增幅从0.3682%扩大到3.9865%。这表明,发达经济体机器人技术进步导致其使用程度提升、成本优势增强、出口产品价格下降,从而使中国出口和福利受损,但中国机器人技术进步,可以促进生产率提升,有效弥补由此带来的损失。毛海涛等(2024)的研究也提供了类似证据:美国机器人使用程度上升10%会导致中国消费者福利下降0.0981%,而中国机器人使用程度上升1.86%即可抵消这一负面效应。此外,本文的结果还显示,机器人进口也可以间接促进中国自动化水平提升,进一步缓解发达经济体机器人应用造成的不利冲击。综上所述,提升自主机器人技术创新能力至关重要,同时,积极引进、消化、吸收国外先进技术并再创新,也是促进中国机器人技术水平提升、增强国际竞争力和改善福利水平的重要途径。

2. 中国降低机器人调整成本

为量化模拟中国降低机器人调整成本所带来的经济效应,本文在保持中国机器人技术水平不变的前提下,分别基于存在和关闭机器人进口渠道的两种情形,考察当调整成本依次下降10%、20%、50%和100%时的对冲效果。具体模拟结果见图2。

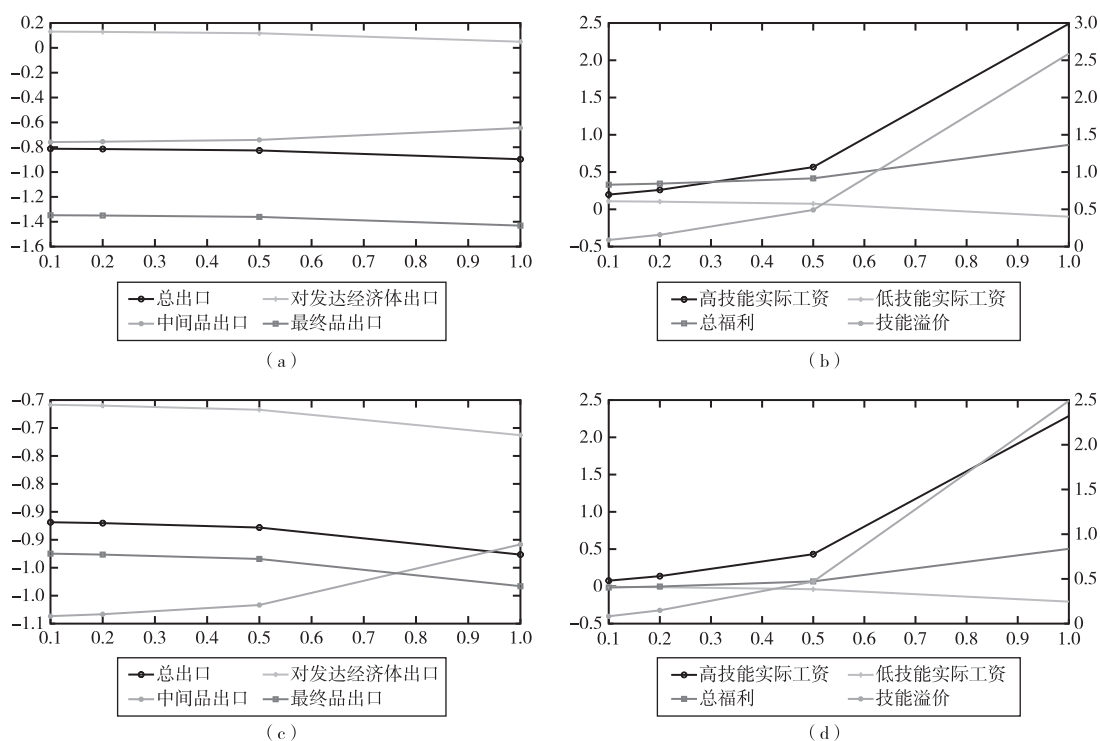


图2 中国降低机器人调整成本对中国贸易和福利的反事实模拟结果

模拟结果表明,中国机器人调整成本下降对贸易和福利的影响呈现出明显的异质性。以存在机器人进口渠道为例,随着调整成本下降幅度从10%扩大至100%,中国的总出口规模由下降0.8124%进一步扩大至下降0.8967%。这一现象的可能机制在于:一方面,调整成本下降促进了机

器人使用程度提升,降低了生产成本,增强了产品的国际竞争力,扩大了出口规模;另一方面,作为全球最大出口国,中国出口价格的下降传导至进口国,压低了全球市场价格水平,反过来削弱了中国自身的出口价格优势和出口增速。在福利方面,中国的实际工资水平明显上升,且高技能劳动力的实际工资增长速度快于低技能劳动力,导致技能溢价进一步扩大。随着调整成本的持续下降,中国的整体福利水平由增长 0.3301% 逐步提高至增长 0.8650%。进一步分解福利变化来源可以发现,福利改善主要源于机器人应用带来的生产率提升,机器人效应从增长 0.4383% 提高到增长 0.9844%,而贸易条件效应则由下降 0.1178% 扩大到下降 0.1303%。上述结果表明,降低机器人调整成本不仅能够有效提升机器人应用水平,降低生产成本,增强产品竞争力,还能够一定程度上对冲发达经济体机器人应用对中国福利带来的负面冲击。因此,政策上亟须加快新型基础设施建设和人力资本积累,切实降低企业在机器人应用过程中因配套设施不完善、高技能人才短缺等因素导致的高昂调整成本,从而为提升中国在全球自动化竞争格局中的地位夯实基础。

3. 中国提高机器人技术水平同时降低其调整成本

本文在提高机器人技术水平的基础上,进一步叠加降低机器人调整成本的情形,设定存在和关闭机器人进口渠道两种情况,反事实模拟中国机器人技术水平分别提高 10%、20%、50% 和 100%,同时调整成本同步下降 10%、20%、50% 和 100%,以全面评估对发达经济体机器人应用冲击的对冲效果。具体量化结果见图 3。

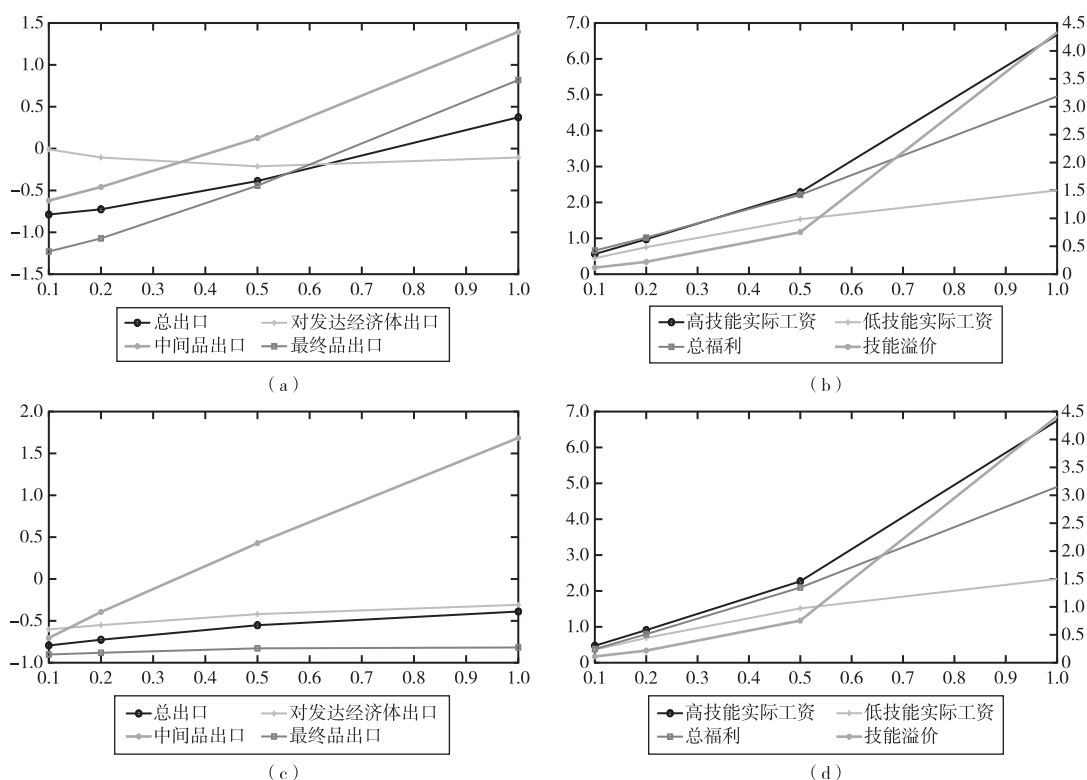


图3 中国提高机器人技术水平同时降低调整成本对中国贸易和福利的反事实模拟结果

模拟结果表明,与单一政策相比,中国提升机器人技术水平与降低调整成本的组合政策能够更有效地对冲发达经济体机器人应用带来的不利影响。以存在机器人进口渠道的情形为例,随着中

国机器人技术水平从提高10%扩展到提高100%,同时调整成本从下降10%扩展到下降100%,中国总出口规模由下降0.7871%逆转为增长0.3738%,技能溢价由增长0.1164%扩大至4.3341%,而福利水平的增幅则由0.6583%提高到4.9558%。这一变化清晰表明,技术进步与成本下降的协同作用在提升出口竞争力与增强整体福利方面具有显著效果。当前,尽管中国在机器人技术研发与应用领域已取得一定进展,但仍面临关键核心技术创新不足、维护成本偏高、技术人才储备不足等制约因素。上述结果进一步强调,基于中国新型基础设施体系的优势,应持续致力于降低机器人应用过程中的调整成本,同时加快推动关键技术突破和机器人广泛应用,全面提升制造业自动化与智能化水平。这不仅是应对发达经济体加速“制造业回流”与“机器换人”的重要举措,也是巩固和提升中国在全球产业链中的竞争力与主动权的关键路径。

七、研究结论与政策启示

基于机器人技术水平与调整成本视角,本文系统探讨了发达经济体机器人应用对中国贸易与福利的影响,研究发现不仅为理解发达经济体“机器换人”举措对发展中国家贸易模式变化的影响提供了新的分析视角,也为中国积极应对发达经济体机器人应用带来的挑战,推动中国经济转型升级与可持续发展,制定应对全球价值链重构的政策措施提供了坚实的实证支持。

1. 研究结论

(1)通过简约式估计得到的特征事实显示,发达经济体机器人使用降低了中国对发达经济体的出口规模。机制分析进一步揭示,机器人应用对中国不同类别产品的出口影响呈现出明显异质性:对资本品和消费品等最终产品出口产生负面冲击,对简单中间品出口有促进作用,对复杂中间品的影响不显著。此外,从加工贸易的视角出发,机制检验结果表明,发达经济体机器人应用显著抑制了中国加工贸易出口规模,但对一般贸易出口规模影响不大。

(2)基于结构式估计的量化分析结果显示,发达经济体机器人调整成本变化使中国总出口下降0.1624%,福利水平减少0.0062%,但总体影响幅度较小。相比之下,发达经济体机器人技术水平提升对中国贸易和福利的冲击更为复杂且显著。具体而言,在关闭机器人进口渠道的设定下,发达经济体机器人技术进步导致中国总出口下降0.7028%,其中,向发达经济体的中间品出口下降0.0181%,最终品出口下降0.5536%;而在存在机器人进口渠道的情形下,发达经济体机器人技术进步通过进口贸易产生的技术溢出效应一定程度上缓解了中国受到的负面冲击。总体看,发达经济体机器人技术冲击对中国福利产生负面影响。进一步的反事实模拟分析表明,中国自身提高机器人使用水平在一定程度上可以对冲发达经济体自动化带来的负面影响。其中,机器人技术进步对推动中国出口增长和福利水平的提升作用较大,而机器人调整成本下降对福利水平的提升幅度相对较小,主要提升高技能劳动工资水平,同时也会扩大技能溢价。值得注意的是,将机器人技术进步与调整成本下降相结合的政策组合,具有更为显著的对冲效果。

2. 政策启示

(1)应加大机器人技术研发力度,降低机器人使用的调整成本。要加大对机器人核心技术领域的自主研发投入,特别是在传感器、控制系统和人机协作等关键技术上实现突破,提升国产机器人的整体竞争力。这不仅有助于减少机器人进口依赖,还能提升中国在全球机器人产业链中的地位,推动相关产业实现高质量发展。同时,机器人作为人工智能、云计算、5G等前沿技术的集成应用载体,完善相关新型基础设施至关重要。这将显著降低企业在安装、调试、运行和维护过程中的配套

成本,提高机器人的使用效率,切实解决当前企业“买得起但用不起”的实际困境。

(2)应优化全球价值链布局,积极拓展多元化市场。企业需根据国际市场变化趋势,主动调整全球价值链布局,减少对单一市场的过度依赖。本文研究发现,发达经济体机器人应用对中国贸易的冲击呈现显著异质性,与企业在全球价值链中的分工地位密切相关。中国企业应积极开拓新兴市场,特别是加强共建“一带一路”多边合作,拓宽出口渠道,分散外部市场风险。同时,应加大研发投入,提升出口产品的质量与技术含量,通过技术创新实现价值链攀升,从传统低附加值制造环节向高附加值的研发、设计和品牌管理环节升级。这不仅有助于增强中国企业在国际市场上的话语权,也有助于中国实现全球价值链中的位置上移。通过市场多元化和价值链升级双轮驱动,中国企业将具备更强的韧性和抗冲击能力,更从容应对外部环境变化。

(3)应大力加强人力资本建设,促进包容性发展。随着机器人技术的广泛应用,企业对高技能劳动力的需求持续上升。中国在推动机器人技术普及的同时,必须同步提升劳动力素质和技能结构。一方面,应持续增加对高等教育,尤其是科技创新和技术适应能力培养方面的投入;另一方面,应加快应用型学科建设,重点培养掌握先进制造和智能化技术的高技能人才,满足企业智能化转型的实际需要。为实现这一目标,建议深化大学与职业院校的合作,设计更加契合未来技术发展的课程体系,缩小技能差距,使更多劳动者能够从技术进步中受益。同时,完善劳动力市场政策,加大对职业技能培训和再培训项目的支持,帮助劳动者提升应对技术变革的能力,缓解机器人应用对传统就业岗位冲击。通过加强职业教育体系建设和实施再技能提升计划,有效提升劳动者在动态劳动力市场中的适应性、稳定性,实现经济转型与社会包容发展的良性互动。

〔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〕段玉婉,陆毅,蔡龙飞.全球价值链与贸易的福利效应:基于量化贸易模型的研究〔J〕.世界经济,2022,(6):3-31.
- 〔3〕胡翠,王宁.工业机器人与全球生产网络演化——基于量化结构模型方法的研究〔J〕.中国工业经济,2024,(1):93-111.
- 〔4〕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.
- 〔5〕李磊,马欢.从“生产回岸”谈“稳外资”——基于发达国家机器人使用驱动的分析〔J〕.管理世界,2023,(10):41-57.
- 〔6〕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.
- 〔7〕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.
- 〔8〕马欢,李磊,盛斌,徐刚.全球生产智能化对中国贸易与福利的影响〔J〕.世界经济,2024,(9):3-32.
- 〔9〕毛海涛,杨灿宇,张洁.工业机器人、投入产出关联与消费者福利——基于开放框架的量化分析〔J〕.数量经济技术经济研究,2024,(6):46-66.
- 〔10〕彭水军,吴腊梅.RCEP的贸易和福利效应:基于全球价值链的考察〔J〕.经济研究,2022,(8):98-115.
- 〔11〕綦建红,张志彤.机器人应用与出口产品范围调整:效率与质量能否兼得〔J〕.世界经济,2022,(9):3-31.
- 〔12〕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,(10):159-175.
- 〔13〕杨曦,徐杨.双边贸易失衡与美国制造业就业变动——“中国贸易冲击”的量化及效应分析〔J〕.经济学(季刊),2022,(2):703-726.
- 〔14〕Acemoglu, D., and P. Restrepo. Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor〔J〕. Journal of Economic Perspectives, 2019, 33(2):3-30.
- 〔15〕Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets〔J〕. Journal of Political Economy,

- 2020, 128(6):2188–2244.
- [16] Acemoglu, D., and P. Restrepo. Tasks, Automation, and the Rise in U.S. Wage Inequality[J]. *Econometrica*, 2022, 90(5):1973–2016.
- [17] Agrawal, A. K., J. S. Gans, and A. Goldfarb. The Turing Transformation: Artificial Intelligence, Intelligence Augmentation, and Skill Premiums[R]. NBER Working Paper, 2023.
- [18] Alguacil, M., A.L. Turco, and I. Martínez-Zarzoso. Robot Adoption and Export Performance: Firm-level Evidence from Spain[J]. *Economic Modelling*, <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105912>, 2022.
- [19] Antràs, P. De-Globalisation? Global Value Chains in the Post-COVID-19 Age[R]. NBER Working Paper, 2020.
- [20] Artuc, E., L. Christiaensen, and H. Winkler. Does Automation in Rich Countries Hurt Developing Ones? Evidence from the U.S. and Mexico[R]. World Bank Policy Research Working Paper, 2019.
- [21] Artuc, E., P. Bastos, and B. Rijkers. Robots, Tasks, and Trade[J]. *Journal of International Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2023.103828>, 2023.
- [22] Caliendo, L., and F. Parro. Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA[J]. *Review of Economic Studies*, 2015, 82(1):1–44.
- [23] Caliendo, L., M. Dolabella, M. Moreira, M. Murillo, and F. Parro. Voluntary Emission Restraints in Developing Economies: The Role of Trade Policy[R]. NBER Working Paper, 2024.
- [24] 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.
- [25] Conley, T. G., C. B. Hansen, and P. E. Rossi. Plausibly Exogenous[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2012, 94(1):260–272.
- [26] Dekle, R., J. Eaton, and S. Kortum. Unbalanced Trade[J]. *American Economic Review*, 2007, 97(2):351–355.
- [27] DeStefano, T., and J. Timmis. Robots and Export Quality[J]. *Journal of Development Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103248>, 2024.
- [28] Faber, M. Robots and Reshoring: Evidence from Mexican Labor Markets[J]. *Journal of International Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2020.103384>, 2020.
- [29] Fontagné, L., A. Reshef, G. Santoni, and G. Vannelli. Automation, Global Value Chains and Functional Specialization[J]. *Review of International Economics*, 2024, 32(2):662–691.
- [30] Galle, S., and L. Lorentzen. The Unequal Effects of Trade and Automation across Local Labor Markets[J]. *Journal of International Economics*, <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2024.103912>, 2024.
- [31] Graetz, G., and G. Michaels. Robots at Work[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2018, 100(5):753–768.
- [32] Guerreiro, J., S. Rebelo, and P. Teles. Should Robots Be Taxed[J]. *Review of Economic Studies*, 2022, 89(1):279–311.
- [33] Hémous, D., and M. Olsen. The Rise of the Machines: Automation, Horizontal Innovation, and Income Inequality[J]. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2022, 14(1):179–223.
- [34] Koch, M., I. Manuylov, and M. Smolka. Robots and Firms[J]. *Economic Journal*, 2021, 131(638):2553–2584.
- [35] Kugler, A. D., M. Kugler, L. Ripani, and R. Rodrigo. U.S. Robots and Their Impacts in the Tropics: Evidence from Colombian Labor Markets[R]. NBER Working Paper, 2020.
- [36] Levchenko A. A., and J. Zhang. The Evolution of Comparative Advantage: Measurement and Welfare Implications[J]. *Journal of Monetary Economics*, 2016, 78:96–111.
- [37] Rodrik, D. New Technologies, Global Value Chains, and Developing Economies[R]. NBER Working Paper, 2018.
- [38] Stemmler, H. Automated Deindustrialization: How Global Robotization Affects Emerging Economies—Evidence from Brazil[J]. *World Development*, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106349>, 2023.
- [39] Tombe, T., and X. Zhu. Trade, Migration, and Productivity: A Quantitative Analysis of China[J]. *American Economic Review*, 2019, 109(5):1843–1872.

Analysis of the Trade and Welfare Effects of Robot Adoption in Developed Economies on China

ZHANG Tian-ding, GAN Su-mei

(Economics and Management School, Wuhan University)

Abstract: In the current context of weak global economic recovery and complex international situations, some developed economies need to respond to the rising domestic discourse on “reindustrialization” while facing pressure from the continuously rising labor costs of outsourced production bases. With abundant capital and technological advantages, these countries are intensively introducing industrial policies to promote the “return” of manufacturing and accelerate the comprehensive process of “machine substitution”. The application of robots in developed countries significantly enhances their production efficiency and reshapes their competitive advantages, while simultaneously reducing the importance of comparative advantages in labor costs, thereby weakening the ability of developing countries to participate in the global division of labor and consequently compressing their gains from trade. Given China’s pivotal position in the global value chains (GVCs) and its retention of typical developing country characteristics, will automation in developed economies have adverse impacts on China’s trade and welfare?

This paper integrates reduced-form and structural methods to systematically investigate the impact of robot applications in developed countries on China’s trade and welfare. In terms of the reduced-form estimation, this paper uses the two-stage least squares (2SLS) method to study how the application of robots in developed countries affects China’s exports based on provincial panel data from China from 2009 to 2019. In terms of structural estimation, this paper introduces robot variables into the quantified trade model, endogenizing robot prices and breaking down the usage costs into purchase costs and adjustment costs. With the help of this model, this paper comprehensively assesses the impact of robotization in advanced economies on China’s trade and welfare in two dimensions: the upgrading of robot technology and the changes in adjustment costs.

This paper finds that the use of robots in developed countries significantly reduces China’s export scale to developed countries. Mechanism analysis further reveals that the impact of robot application on China’s exports of different categories of products shows significant heterogeneity: It has a negative impact on the export of final products such as capital goods and consumer goods while promoting the export of simple intermediate goods, and the impact on complex intermediate goods is not yet significant. Counterfactual simulation results show that the decline in adjustment costs of robots in developed economies suppresses China’s exports, but the effect on welfare is relatively small. The advancement of robot technology in developed economies has a more complex impact on China: On one hand, it reduces exports and harms welfare; on the other hand, it significantly lowers the production costs and prices of robots, prompting China to increase its robot imports to reduce production costs, thereby partially offsetting the aforementioned negative effects. Further research indicates that China’s robotization can buffer external automation shocks. In terms of policy comparison, improving domestic robot technology levels has the most significant pull for export expansion and welfare enhancement; reducing adjustment costs mainly raises the wages of high-skilled workers, with a relatively smaller effect on welfare; if both are advanced simultaneously, the offsetting effect is the strongest.

This paper proposes the following policy implications based on the research conclusions. Firstly, efforts should be made to increase R&D in robot technology and reduce the adjustment costs of using robots. Secondly, the layout of the GVCs should be optimized, actively expanding into diversified markets. Finally, there should be a strong emphasis on enhancing human capital development to promote inclusive growth.

Keywords: production reshoring; robotic technology levels; robot adoption costs; trade effects; welfare effects

JEL Classification: F14 F17 C67

[责任编辑:王燕梅]