

# 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

毛海涛 杨灿宇 张洁\*

**摘要:** 工业机器人的加速渗透将通过国际投入产出关联深刻影响各国消费者福利。本文构建包含机器人与投入产出关联的理论模型,将机器人的福利效应分解为直接效应和间接效应,并估计机器人使用程度和投入产出系数等外生参数,量化评估机器人的福利效应。研究发现:2014~2020年机器人使用程度变化引致大多数国家消费者福利上升,直接效应起主导作用,中国消费者福利上升3.97%。若不考虑中间投入品,各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过40%;若不考虑投入产出关联,各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过10%。若中国机器人使用程度上升10%,则中国消费者福利上升0.54%,世界各国消费者福利平均上升0.006%。若美国机器人使用程度上升10%,则中国消费者福利下降0.10%,世界各国消费者福利平均下降0.02%。中国机器人使用程度上升1.86%即可抵消美国机器人使用程度上升10%带来的负面影响。本文为机器人的福利效应研究提供了新的理论框架,实现了机器人福利效应的精确评估,为政策选择提供了微观理论基础。

**关键词:** 工业机器人 消费者福利 投入产出关联

**中图分类号:** F74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3894(2024)06-0046-21

## 一、引言

在市场需求拉动和技术创新推动的双重驱动下,以机器人为核心的人工智能在全球范围内迅猛发展,成为世界各国战略博弈的焦点。党的二十大报告强调“构建新一代信息技术、人工智能等一批新的增长引擎”。作为战略性技术,机器人的发展和应用通过生产率效应和替代效应影响劳动力市场(Acemoglu和Restrepo, 2019a、2019b),也可能通过贸易条件效应深刻影响贸易格局(Bonfiglioli等, 2022)。因此,在开放框架下,量化机器人的福利效应,厘清中国和世界经济体使用机器人对消费者福利的影响机制,助推消费者福利提升,适时启动和调整机器人相关政策,显得尤为关键。

\* 毛海涛,副教授,中南财经政法大学工商管理学院,电子邮箱: qрмаоһаітао@163.com;杨灿宇,硕士研究生,中南财经政法大学工商管理学院,电子邮箱: stevenycyyang@163.com;张洁(通讯作者),助理研究员,南开大学经济学院,电子邮箱: zhangjiezhj1994@163.com。本文获得国家自然科学基金面上项目(72173137, 72073075)、国家自然科学基金青年项目(72303118)、中国博士后科学基金第73批面上项目(bshms73020)和湖北省青年拔尖人才培养项目的资助。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

随着全球化进程的加速,国际分工日益深化,专业化水平不断提升,各国各行业经济联系日益密切。一国某行业工业机器人的使用不仅直接影响本国本行业产品价格,还将通过国际投入产出关联,间接影响其他国家各行业生产成本,他国工业机器人使用程度变化也将影响本国消费者福利。因此,世界各国消费者福利既受各国工业机器人使用程度的影响,也与国际间的投入产出关联强度相关。那么,在国际投入产出关联背景下,中国工业机器人使用程度变化将通过什么渠道影响世界各国消费者福利?影响程度有多大?他国工业机器人使用程度变化对中国消费者福利有何影响?中国可采取什么措施来抵消这一外部冲击?本文尝试回答以上问题。

具体而言,本文构建包含投入产出关联的多国多行业理论模型,利用现实数据对投入产出系数、工业机器人使用程度等多个参数进行估计,迭代求解出工业机器人对各国消费者福利的异质性影响。量化分析表明:(1)2014~2020年,工业机器人使用程度变化引致大多数国家消费者福利上升,中国消费者福利上升3.97%,仅智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯的消费者福利下降。一国消费者福利变化取决于直接效应和间接效应,其中,间接效应包含贸易条件效应和贸易量效应,且直接效应占主导作用。(2)若不考虑中间投入品,世界各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过40%;若不考虑投入产出关联,世界各国消费者福利变化幅度大都超过10%。(3)反事实模拟发现,中国消费者福利随工业机器人使用程度上升而增加,当中国工业机器人使用程度上升10%时,中国消费者福利上升0.54%,世界各国消费者福利平均上升0.006%。(4)反事实模拟美国工业机器人使用程度上升的福利效应,以探究发达国家工业机器人发展水平上升对世界各国的影响,研究表明,若美国工业机器人使用程度上升10%,世界各国消费者福利平均下降0.02%,其中,中国消费者福利下降0.10%,而中国工业机器人使用程度上升1.86%即可抵消其对中国消费者福利造成的负面影响。

与本文研究相关的第一类文献为工业机器人经济效应研究。已有文献分别从以下几个方面进行探究。一是工业机器人对劳动力市场的影响。工业机器人对劳动力市场的影响程度和方向取决于替代效应和生产率效应(Acemoglu和Restrepo,2019a,2019b)的权衡。一些学者认为机器人的经济效应以替代效应为主,引发职业替代风险(王林辉等,2022),减少劳动力份额(Acemoglu和Restrepo,2022),降低劳动力的实际工资(Acemoglu和Restrepo,2018a;Acemoglu和Loebbing,2022),显著降低劳动力就业水平,对就业造成冲击(Hémous和Olsen,2022;孔高文等,2020;王永钦和董雯,2020;何小钢和刘叩明,2023),扩大城镇居民收入差距(周广肃和丁相元,2022)。也有学者持对立观点,认为工业机器人所带来的生产率效应能抵消替代效应,通过提升企业生产率(李磊等,2023)、扩大产出规模(Acemoglu和Restrepo,2018b)、创造更多的工作岗位(魏下海等,2020),对劳动力总体就业存在显著互补效应(王晓娟等,2022;郑丽琳和刘东升,2023),从而缩小劳动力收入差距(陈东和秦子洋,2022);二是工业机器人对全球价值链分工的影响。工业机器人通过降低企业成本(吕越等,2023)、降低贸易成本(刘斌和潘彤,2020)、影响全球贸易分工形态(何宇等,2021),进而影响全球价值链分工;三是工业机器人对全要素生产率的影响。部分研究表明,工业机器人的使用有助于全要素生产率的提升(Graetz和Michaels,2018;吕越等,2020),但也有学者发现工业机器人对生产率的增长呈现短期抑制效应(Gordon,2016;程文,2021);四是工业机器人对经济增长的影响。工业机器人的使用将通过提高生产率、促进资本需求、提高投资回报率、增加储蓄率和投资率(陈彦斌等,2019)、优化资本结构(林晨等,2020)、推动城市层级结构分化(王书斌,2020)、促进价值增值(Cali和Presidente,2021)等多种途径促进经济增长(杨光和侯钰,2020)。

与本文研究相关的第二类文献为机器人与消费者福利研究。已有文献大都在封闭背景

下,探究工业机器人对消费者福利的影响。工业机器人主要通过生产率效应(Acemoglu和Restrepo,2018b)、弥补劳动力短缺(Vermeulen等,2020)、改善实际工资(Fujiwara和Zhu,2020),提升消费者福利。此外,Damiani等(2020)也指出在知识积累率高的创新制度中,工业机器人的使用能显著提高劳动力工资。然而,也有学者持不同观点,认为工业机器人的使用主要通过替代效应(Acemoglu和Restrepo,2018a)、减缓工资增长速度(Gries和Naudé,2018)、加速劳动力份额下降(Acemoglu和Restrepo,2020),进而抑制实际工资增长(Leduc和Liu,2019),加剧收入不平等(Domini等,2022)。

目前仅有少量文献关注到工业机器人使用的跨国溢出效应。发达国家使用机器人将通过影响国际贸易(Bonfiglioli等,2022;Artuc等,2023;Stemmler,2023)、制造业回流(Hallward-Driemeie和Nayyar,2019)、跨国企业外包(李磊等,2023)对世界经济产生影响。其中,Artuc等(2023)研究表明,北方国家机器化程度提升,虽然提升了该地区的总体福利,却导致南方国家工人的工资水平下降。但随着工业机器人价格下降,这一不利情形会得到扭转。Stemmler(2023)通过理论模型和42个国家的实证分析,探讨了自动化技术如何影响各国对中间产品和最终产品的需求,并据此评估其对劳动力市场的影响。此外,Bonfiglioli等(2022)研究指出,机器人技术的应用可能会恶化贸易条件,进而抑制国内工人的实际工资增长。Artuc等(2022)研究发现,从1995年到2015年,发达国家使用工业机器人不仅促进发达国家和发展中国家之间的贸易,还有助于全球福利水平的提升。此外,Cali和Presidente(2021)研究发现印度尼西亚机器人密度增加将降低企业实际边际成本,增加企业成本加成,进而影响发达国家贸易。

相较于已有研究,本文边际贡献如下:首先,本文构建了包含机器人与投入产出关联的开放框架理论模型,并将工业机器人的福利效应分解为直接效应和间接效应(包含贸易条件效应和贸易量效应),为后续理论探究与量化评估提供了基础框架。其次,已有文献大都探究本国使用工业机器人对本国经济的影响,鲜有文献研究他国工业机器人使用对本国的影响,本文分别反事实模拟了中国和美国工业机器人使用程度上升等不同情形下,世界各国消费者福利的变化,与已有简约式估计文献形成互补。最后,政策选择方面,基于反事实模拟的结果,可选择有利于放大工业机器人福利效应的相关政策,为政策选择提供微观理论基础。

本文余下部分结构安排如下:第二部分为理论模型;第三部分为参数估计;第四部分为量化分析;第五部分为反事实分析;第六部分为结论与政策建议。

## 二、理论模型

本文借鉴Artuc等(2023)刻画工业机器人的方式,将工业机器人纳入Caliendo和Parro(2015)框架,构建了包含中间品贸易和投入产出关联的多国多行业理论模型,假设中间品可贸易,最终品不可贸易,劳动力可以跨部门移动,但不能跨国移动。整个世界包含 $N$ 个国家,用 $i$ 、 $n$ 和 $h$ 表示。每个国家有 $J$ 个行业,用 $j$ 和 $g$ 表示。所有市场结构均为完全竞争市场。参照Artuc等(2023)和Acemoglu和Restrepo(2018a、2019)等,外生给定工业机器人租金。

### (一)消费者偏好

假设 $n$ 国代表性消费者偏好由如下柯布-道格拉斯效用函数表示:

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

其中, $C_n^j$ 为代表性消费者对 $n$ 国 $j$ 行业最终产品的消费量; $\alpha_n^j$ 表示代表性消费者对 $n$ 国 $j$ 行业最

终产品的支出份额,且 $\sum_{j=1}^J \alpha_n^j = 1$ 。

## (二) 机器人与中间品生产

假设生产函数为柯布-道格拉斯形式,每个行业都生产连续的中间品 $\omega^j \in [0, 1]$ ,且每种商品都需要两种投入品:一是任务投入品,由工业机器人和劳动力共同组成;二是复合中间品。生产函数为:

$$q_n^j(\omega^j) = z_n^j(\omega^j) (T_n^j)^{\gamma_n^j} \prod_{g=1}^J [m_n^{g,j}(\omega^j)]^{\gamma_n^{g,j}} \quad (2)$$

其中, $\gamma_n^j + \sum_{g=1}^J \gamma_n^{g,j} = 1$ ;  $z_n^j(\omega^j)$ 为 $n$ 国 $j$ 行业中间品 $\omega^j$ 的生产率; $T_n^j$ 表示 $n$ 国 $j$ 行业生产中间品 $\omega^j$ 所需的复合任务量; $m_n^{g,j}(\omega^j)$ 代表 $n$ 国 $j$ 行业生产中间品 $\omega^j$ 所使用的来自 $g$ 行业的复合中间品; $\gamma_n^j$ 为任务增加值份额; $\gamma_n^{g,j}$ 为 $n$ 国 $j$ 行业生产中间品 $\omega^j$ 所需的来自 $g$ 行业复合中间品的份额。

借鉴 Artuc 等(2023)<sup>①</sup>,假设产品种类 $\omega^j$ 的生产需要特定的复合任务投入品,而复合任务投入品的生产需要执行任务 $k \in [0, 1]$ 。当 $k \in [0, K_n^j]$ 时,可以由工业机器人或者劳动力执行;而当 $k \in (K_n^j, 1]$ 时,只能由劳动力执行,其中, $K_n^j$ 为 $n$ 国 $j$ 行业工业机器人使用程度,即 $n$ 国 $j$ 行业任务中能被工业机器人替代的最大可能性。

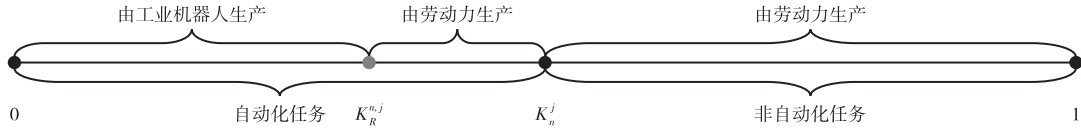


图1 任务区间分布图

假设使用某项任务 $k$ 生产一单位产品 $\omega^j$ 所需劳动力数量为 $\phi_L \zeta_L(k)$ ,当 $k \leq K_n^j$ 时,工业机器人可以替代劳动力并完成任务,且完成相同任务所需要的工业机器人数量为 $\phi_R \zeta_R(k)$ 。其中,单位劳动力工资为 $w_L^n$ ,单位工业机器人租金为 $w_R$ ,并假设 $\zeta_L(k)$ 和 $\zeta_R(k)$ 均服从形状参数为 $v$ 的威布尔分布,进而可以推出, $n$ 国 $j$ 行业生产过程中工业机器人执行的最优任务量为<sup>②</sup>:

$$K_R^{n,j} = \frac{(\phi_R w_R)^{-v}}{(\phi_R w_R)^{-v} + (\phi_L w_L^n)^{-v}} K_n^j \quad (3)$$

使用工业机器人和不使用工业机器人进行生产的单位任务相对成本为<sup>③</sup>:

$$\Omega^{n,j} = \psi^{n,j} \frac{w_R^{n,j}}{w_L^n} = 1 - K_n^j + K_n^j \left( 1 - \frac{K_R^{n,j}}{K_n^j} \right)^{\frac{1}{v}} \quad (4)$$

① 目前有关工业机器人相关研究建模主要分为两类,大量文献仅刻画工业机器人使用程度 $K_n^j$ ,并未刻画生产中实际使用的工业机器人程度(Susskind, 2017; Stapleton and Webb, 2020; Acemoglu and Restrepo, 2018a, 2019, 2020);而少量文献不仅刻画工业机器人使用程度 $K_n^j$ ,而且刻画了生产中实际使用机器人程度(Acemoglu and Restrepo, 2018b, 2019; Artuc 等, 2023),而 Artuc 等(2023)在 Acemoglu 和 Restrepo(2018b)的基础上进一步求出生产过程中实际工业机器人使用程度与名义工业机器人使用程度的表达式,为便于量化,借鉴该篇文章。

② 囿于篇幅,本文仅展示主要模型,部分模型展示于附录 A,本文附录详见《数量经济技术经济研究》杂志网站,下同。

③ 其中, $\psi^{n,j} = \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{v} \right) \phi_L \right]^{-1}$ 。

均衡条件下生产每单位任务所需的劳动力数量为：

$$\Xi^{n,j} = \psi^{n,j} \frac{L^{n,j}}{T^{n,j}} = 1 - K_n^j + K_n^j \left( 1 - \frac{K_R^{n,j}}{K_n^j} \right)^{1+\frac{1}{\nu}} \quad (5)$$

假设中间品生产的规模报酬不变,且市场完全竞争,因此价格为  $c_n^j/z_n^j(\omega^j)$ ,  $c_n^j$  为单位投入成本,  $P_n^g$  为  $g$  行业复合中间品价格,由此可求出成本函数  $c_n^j$ 。

$$c_n^j = \Upsilon_n^j (w_T^{n,j})^{\gamma_n^j} \prod_{k=1}^J (P_n^g)^{\gamma_n^{g,j}} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \Upsilon_n^j = \left( \frac{1}{\gamma_n^j} \right)^{\gamma_n^j} \prod_{g=1}^J \left[ \frac{1}{\gamma_n^{g,j}} \right]^{\gamma_n^{g,j}}。$$

### (三) 复合中间品生产

在购买每一种中间品  $\omega^j$  时,  $n$  国  $j$  行业的复合中间产品生产者会从所有国家中选择最低价的供应商购买中间品  $\omega^j$ , 令  $\sigma^j$  为  $j$  行业中间品的替代弹性, 则复合中间品的生产函数为：

$$Q_n^j = \left[ \int r_n^j(\omega^j)^{\frac{\sigma^j-1}{\sigma^j}} d\omega^j \right]^{\frac{\sigma^j}{\sigma^j-1}} \quad (7)$$

$$\text{其中, } r_n^j(\omega^j) = \left( \frac{p_n^j(\omega^j)}{P_n^j} \right)^{-\sigma^j} Q_n^j \text{ 为 } n \text{ 国 } j \text{ 行业中间品 } \omega^j \text{ 的需求量, 且 } P_n^j = \left[ \int p_n^j(\omega^j)^{1-\sigma^j} d\omega^j \right]^{\frac{1}{1-\sigma^j}}$$

为  $n$  国  $j$  行业复合中间品的价格指数。其中,  $p_n^j(\omega^j)$  为所有区域中间品  $\omega^j$  的最低价格。  $n$  国  $j$  行业的复合中间品有两个用途：一是作为投入品, 投入  $g$  行业中间品的生产中, 数量为  $m_n^{j,g}(\omega^g)$ , 该情形下复合中间品可贸易；二是用作最终消费者消费, 数量为  $C_n^j$ , 该情形下复合中间品不可贸易。所以,  $n$  国  $j$  行业生产的复合中间品市场出清条件为：

$$Q_n^j = C_n^j + \sum_{g=1}^J \int m_n^{j,g}(\omega^g) d\omega^g \quad (8)$$

### (四) 国际贸易与贸易平衡

贸易成本包括冰山贸易成本  $d_{ni}^j$  和从价关税  $\tau_{ni}^j$ 。冰山贸易成本  $d_{ni}^j \geq 1$ ,  $\tau_{ni}^j$  为国家  $n$  从国家  $i$  进口每单位产品时的从价税率, 则单位产品贸易成本  $\kappa_{ni}^j$  可以表示为：

$$\kappa_{ni}^j = \tilde{\tau}_{ni}^j d_{ni}^j = (1 + \tau_{ni}^j) d_{ni}^j \quad (9)$$

假设  $\kappa_{nh}^j \kappa_{hi}^j \geq \kappa_{ni}^j$ , 即国家  $n$  从国家  $i$  直接进口的单位产品贸易成本小于在其他国进行中转并运输的单位产品贸易成本。

$n$  国购买中间品  $\omega^j$  的成本(价格)为：

$$p_n^j(\omega^j) = \min_i \left\{ \frac{c_i^j \kappa_{ni}^j}{z_i^j(\omega^j)} \right\} \quad (10)$$

借鉴 Eaton 和 Kortum (2002), 假设企业生产率  $z_n^j(\omega^j)$  服从 Fréchet 分布, 函数形式为  $F_n^j(z) = e^{-\lambda_n^j z^{-\theta}}$ 。其中,  $\lambda_n^j$  为位置参数,  $\theta$  为形状参数,  $\lambda_n^j$  越大表示该行业的平均生产率越高, 而  $\theta$  越小意味着产品间生产率越分散。

所以,  $n$  国  $j$  行业的复合中间品的价格为：

$$P_n^j = A^j \left[ \sum_{i=1}^N \lambda_i^j (c_i^j \kappa_{ni}^j)^{-\theta} \right]^{-1/\theta} \quad (11)$$

$n$  国的价格指数为：

$$P_n = \prod_{j=1}^J \left( \frac{P_n^j}{\alpha_n^j} \right)^{\alpha_n^j} \quad (12)$$

$n$  国对  $i$  国  $j$  行业产品的支出份额为：

$$\pi_{ni}^j = \frac{X_{ni}^j}{X_n^j} = \frac{\lambda_i^j (c_i^j \kappa_{ni}^j)^{-\theta^j}}{\sum_{h=1}^N \lambda_h^j (c_h^j \kappa_{nh}^j)^{-\theta^j}} \quad (13)$$

其中,  $X_n^j = P_n^j Q_n^j$  为  $n$  国  $j$  行业的总支出,  $X_{ni}^j$  为  $n$  国对  $i$  国  $j$  行业产品的支出。

$n$  国对  $j$  行业产品的总支出是复合中间品支出和最终品支出之和：

$$X_n^j = \sum_{g=1}^J \gamma_n^{j,g} \sum_{i=1}^N X_i^g \frac{\pi_{in}^g}{1 + \tau_{in}^g} + \alpha_n^j I_n \quad (14)$$

其中,  $I_n = \sum_{j=1}^J (w_T^{n,j} T^{n,j}) + R_n + D_n = \sum_{j=1}^J \frac{\Omega^{n,j} w_L^n L^{n,j}}{\Xi^{n,j}} + R_n + D_n$ <sup>①</sup>, 即  $n$  国总收入由劳动工资收入、工业机器人租金、关税收入以及贸易赤字构成<sup>②</sup>。  $\alpha_n^j$  为  $j$  行业产品作为最终产品的支出份额。  $M_{ni}^j = X_n^j \frac{\pi_{ni}^j}{1 + \tau_{ni}^j}$  为  $n$  国对  $i$  国  $j$  行业产品的不含关税的进口额;  $E_{ni}^j = X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j}$  为  $n$  国对  $i$  国  $j$  行业产品的不含关税的出口额。  $n$  国的关税收入可以表示为:  $R_n = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \tau_{ni}^j M_{ni}^j$ 。 各国贸易逆差总和为 0, 即  $\sum_{n=1}^N D_n = 0$ 。

贸易平衡条件为：

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N X_n^j \frac{\pi_{ni}^j}{1 + \tau_{ni}^j} - D_n = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N X_i^j \frac{\pi_{in}^j}{1 + \tau_{in}^j} \quad (15)$$

(五) 定义均衡

借鉴 Dekle 等 (2007) 提出的精确帽子代数算法 (Exact Hat Algebra), 采用  $\hat{b} = \frac{b'}{b}$  表示  $b$  的变化量,  $b'$  为变化后的变量。 给定外生参数  $\{V_n^j, D_n, \alpha_n^j, \gamma_n^j, \gamma_n^{g,j}, w_L^n, \tau_{ni}^j, \pi_{ni}^j, \theta^j, \nu, K_n^j, K_n^{j'}, \phi_R/\phi_L, w_R\}$ , 根据均衡条件<sup>③</sup>, 便可求解上述模型中的内生变量  $\{\hat{w}_L^n, \hat{\Omega}^{n,j}, \hat{\Xi}^{n,j}, \hat{w}_T^{n,j}, \hat{c}_n^j, \hat{P}_n^j, \hat{\pi}_{ni}^j, X_n^{j'}, I_n^{j'}\}$ , 即劳动力工资变化、任务-劳动力相对成本变化、生产每单位任务所需的劳动力数量变化、单位任务成本相对变化、成本函数变化和价格指数变化等。 利用上述迭代求解后的内生变量, 即可测算各国代表性消费者福利的变化。

(六) 工业机器人使用程度变化的福利效应

为进一步厘清工业机器人影响各国消费者福利的理论机制, 本文将对工业机器人引致的福利效应进行分解, 对  $n$  国代表性消费者福利的变化进行全微分, 可将消费者福利分解为直接效应和间接效应<sup>④</sup>, 其中, 间接效应又可分为贸易条件效应和贸易量效应：

① 其中,  $w_T^{n,j} T^{n,j} = \frac{\Omega^{n,j} w_L^n L^{n,j}}{\Xi^{n,j}}$ 。

② 劳动工资收入和工业机器人租金收入的总和等于任务的报酬。

③ 囿于篇幅, 本文均衡条件详见附录 B。

④ 本文福利分解部分的直接效应包含工业机器人引致的生产率效应和替代效应。 福利分解相关证明过程见附录 C。

$$d\ln W_n = \underbrace{\frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (E_{ni}^j d\ln c_n^j - M_{ni}^j d\ln c_i^j)}_{\text{贸易条件效应}} + \underbrace{\frac{1}{I_n} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \tau_{ni}^j M_{ni}^j (d\ln M_{ni}^j - d\ln c_i^j)}_{\text{贸易量效应}} - \underbrace{\sum_{j=1}^J \frac{w_L^n \Omega^{n,j} L_n^j}{\Xi^{n,j} I_n} d\ln \Xi^{n,j}}_{\text{直接效应}} \quad (16)$$

等式右边第一项为贸易条件效应,衡量世界各国工业机器人使用程度变化引致的本国出口品价格和进口品价格变动所带来的福利变化。若工业机器人使用程度变化引致一国出口品价格相对于进口品价格的上升幅度增加,则该国贸易条件效应得到改善,助力消费者福利上升。同时,本文以行业层面的出口贸易额  $E_{ni}^j$  和进口贸易额  $M_{ni}^j$  为权重,对每个行业的贸易条件效应进行加权求和,得到  $n$  国贸易条件效应。

等式右边第二项为贸易量效应,衡量世界各国工业机器人使用程度变化引起的贸易量变动所带来的福利变化。本文以进口关税所得收入  $\tau_{ni}^j M_{ni}^j$  为权重,用剔除价格因素后的进口额变动  $d\ln M_{ni}^j - d\ln c_i^j$  表示贸易量的变化,考虑投入产出关联下不同行业的差异性影响,本文对不同出口国和行业进行加权平均,得到  $n$  国贸易量效应。若工业机器人使用程度变化提升本国进口产品数量,将改善本国居民消费现状,助力国家消费者福利提升。

等式右边第三项为直接效应,它可以直接衡量世界各国工业机器人使用程度变化如何通过生产率效应和替代效应直接影响各国消费者福利。

### 三、参数估计

基于经合组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)国家间投入产出表(Inter-country Input-output Tables, ICIO)和国际机器人联合会数据库(International Federation of Robotics, IFR)数据库,本文选取52个国家和ROW(Rest of the World),同时,选取农林牧渔业、采矿业等32个行业的数据用于本文的参数估计和量化分析部分<sup>①</sup>。表1对外生参数的估计方法及数据来源进行了说明,如表1所示:

表1 外生参数

参数符号	参数描述	数据来源和估计方法
$V_n^j$	$n$ 国 $j$ 行业增加值	OECD 投入产出表
$D_n$	$n$ 国贸易逆差	OECD 投入产出表
$\alpha_n^j$	$n$ 国 $j$ 行业支出份额	OECD 投入产出表
$\gamma_n^j$	$n$ 国 $j$ 行业增加值份额	OECD 投入产出表
$\gamma_n^{g,j}$	$n$ 国 $j$ 行业购买 $g$ 行业的中间品份额	OECD 投入产出表
$\pi_{ni}^j$	双边贸易份额	OECD 投入产出表
$\tau_{ni}^j$	$n$ 国购买 $i$ 国 $j$ 行业的产品所需支付的关税	联合国贸发数据库(UNCTAD-TRAINS)
$\theta^j$	行业贸易弹性	借鉴 Egger 等(2021)、Caliendo 和 Parro(2015) <sup>②</sup>
$v$	威布尔分布形状参数	借鉴 Artuc 等(2023) <sup>③</sup>
$w_R$	工业机器人租金	Statista 全球统计数据库
$\phi_R/\phi_L$	工业机器人和劳动力生产率之比	借鉴 Acemoglu 和 Restrepo(2020)
$K_n^j, K_n^{j'}$	$n$ 国 $j$ 行业工业机器人使用程度	待估

① 本文选取的52个国家及32个部门是两个数据库共有的。

② 本文对贸易弹性进行稳健性检验,发现其对文章主要结论并无影响。

③ 本文对威布尔形状参数分布进行稳健性检验,发现其对文章主要结论并无影响。

### (一)工业机器人参数

#### 1.工业机器人相关参数

机器人与劳动力生产率之比可用前者对后者的替代率衡量,参考 Acemoglu 和 Restrepo (2020),将机器人与劳动力生产率之比设为  $\phi_k^i/\phi_l^i = 1/6.5$ 。根据 Statista 全球统计数据库,2014 年全球工业机器人平均售价为 45000 美元。因而假设每台工业机器人的价格为 45000 美元,工业机器人每年租金为其价格的 10%<sup>①</sup>,每个工业机器人可以每年工作 365 天,每天工作 24 小时<sup>②</sup>。劳动力的小时工资用各国人均 GDP 与其平均年工作时长之比表示,数据来源于世界收入不平等数据库 (The World Income Inequality Database, WIID) 和国际劳工组织 (International Labour Organization, ILO) 数据库。

#### 2.工业机器人使用程度

Frey 和 Osborne (2017) 首次使用高斯过程分类器对美国职业信息网络数据库 (Occupational Information Network, O\*NET) 中的 702 种职业的可替代风险进行估计。在此基础上,刘涛雄等 (2022) 采用 Lasso 回归筛选关键的职业特征,综合运用线性模型和机器学习的方法测算中国各职业被替代的可能性,并将其加总到行业层面,得到行业层面被替代可能性。

本文参照刘涛雄等 (2022),运用 Lasso 回归、随机森林等方法估计不同国家及行业的工业机器人使用程度  $K_n^i$ ,具体步骤如下:

第 1 步:职业匹配与职业特征的获取。将美国 O\*NET 数据库与美国劳工统计局数据库所包含的职业进行匹配,得到 664 种职业,并根据美国劳工统计局数据库,计算不同行业中不同职业的职业份额。在美国 O\*NET 数据库中,不同职业具有不同的职业特征,且不同的职业特征对该职业的影响可以通过“重要性评分”(Importance) 进行衡量。本文选择美国 O\*NET 数据库中“能力”(Abilities)、“技能”(Skills) 和“工作活动”(Work Activities) 三个板块共 128 个职业特征。在美国 O\*NET 数据库中,每个职业均包含 128 个职业特征的重要性评分,通过该评分可以判断不同职业特征对于不同职业的重要程度。根据公式  $x_{js} = \sum_o \lambda_{oj} z_{os}$  得到行业  $j$  中关于特征  $s$  的平均依赖程度,其中,  $\lambda_{oj}$  为行业  $j$  中职业  $o$  就业人数的比例,  $z_{os}$  为职业  $o$  对职业特征  $s$  的依赖程度,即职业特征  $s$  的“重要性评分”(Importance)。

第 2 步:运用各国各行业的工业机器人密度进行 Lasso 回归,筛选出每个国家对工业机器人使用程度影响较大的职业特征。本文从 IFR 数据库中得到 2014 年和 2020 年不同国家不同行业机器人的库存量,从 OECD 数据库和 ILO 数据库中得到 2014 年和 2020 年不同国家不同行业的就业人数,以行业机器人库存量除以行业就业人数,以求得不同国家不同行业的机器人密度(单位:台/千人),得到 2014 年和 2020 年每个国家采矿业等 17 个行业的机器人密度。

为了从 128 个职业特征中选出与工业机器人使用程度最为相关的职业特征,本文根据公式  $\hat{\beta}_s = \arg \min_{\beta} \left\{ \sum_s \left( y_j - \sum_j \beta_s x_{js} \right)^2 + \gamma \sum_k |\beta_s| \right\}$  将各国各行业工业机器人密度作为因变量进行 Lasso 回归,筛选出每个国家对机器人可替代性影响程度比较大的职业特征,并用  $\hat{\beta}_s$  反应影响程度的大小。其中,

① 参照 Graetz 和 Michaels (2018) 和 Artuc 等 (2023) 机器人库存量采用永续盘存法进行计算,并假定折旧率为 10%。

② 工业机器人工作时长参照 Kumar 和 Balaramachandran (2018) 和 Artuc 等 (2023)。



$\gamma$ 为惩罚变量,通过其筛选对工业机器人影响比较大的职业特征。

第3步:将筛选后的职业特征按照“重要性评分”进行加总,并用随机森林求得不同职业被工业机器人替代的可能性。用Lasso回归筛选的职业特征和估计结果,利用公式  $S_o = \sum_s \hat{\beta}_s z_{os}$ ,将其回归系数与其对应的“重要性评分”相乘并加总,得到职业被替代程度,将职业被替代程度进行排序,选择替代程度最大的35类职业和替代程度最小的35类职业,得到70个职业。每个职业均包含通过Lasso回归得到的15个职业特征变量的训练集,即可利用随机森林分类模型进行计算。随机森林输出的结果为对职业能否替代的判断,即输出“1”(可以被替代)、“0”(不可以被替代)。随机森林判断的依据是职业被标记为“1”的可能性,即职业被替代的可能性。因此,可以得到各个国家664种职业被工业机器人替代的可能性。

第4步:以不同行业的职业份额为权重,加总求得行业层面的工业机器人使用程度。以不同行业的职业份额为权重,对每个国家的664种职业按照不同行业分别进行加权,从而得到不同国家不同行业工业机器人被替代可能性  $K_n^j$ ,部分结果见表2<sup>①</sup>。

表2 2014年部分行业工业机器人使用程度(以中国为例)

职业名称	被替代可能性
食品、饮料和烟草制造业	0.106
纺织品、皮革和鞋类制造业	0.101
木制品制造业	0.110
石油和煤制品制造业	0.117
化学制造业	0.123
塑料及橡胶制品制造业	0.119

### (二)投入产出参数

本文采用2014年OECD国家间投入产出表,获取所选国家以及世界其他经济体的增加值份额  $\gamma_n^j$ 、中间品投入份额  $\gamma_n^{s,j}$ 、贸易逆差  $D_n$ 、进口贸易额比重  $\pi_n^j$ 以及支出份额  $\alpha_n^j$ 。

### (三)关税

本文从UNCTAD-TRAINS数据库获取2014年52个国家及ROW的HS8位数产品层面的关税税率,将各国之间关税加权为HS4位数产品层面的关税税率,并将HS编码与ISIC Rev.4分位编码进行匹配,以得到行业层面的国家间关税税率数据。

## 四、量化分析

基于上述理论模型和外生参数,本文以2014年为基础年份,探究世界各国存在关税情形下,2014~2020年工业机器人使用程度的变化对世界各国消费者福利的影响,并进行量化分析,所得结果如表3所示。

<sup>①</sup> 囿于篇幅,正文仅展示中国部分行业的工业机器人使用程度,详见附录D。

表3 2014~2020年工业机器人使用程度变化对世界各国消费者福利的影响及效应分解(单位:%)

国家	消费者福利变化	间接效应		直接效应	不使用中间投入品的消费者福利变化	不考虑投入产出关联的消费者福利变化
		贸易条件效应	贸易量效应			
澳大利亚	4.403	-0.132	0.015	4.520	6.602	5.640
奥地利	5.521	-0.229	0.046	5.704	8.360	5.632
比利时	0.867	1.297	0.023	-0.453	-0.159	-1.602
加拿大	9.443	-0.657	0.025	10.074	14.872	9.828
智利	-5.761	1.524	-0.003	-7.282	-7.019	-2.687
哥伦比亚	2.942	0.167	0.014	2.761	3.757	3.706
捷克共和国	11.942	-2.429	0.192	14.178	20.309	12.248
丹麦	4.048	-0.027	0.030	4.044	4.546	5.624
爱沙尼亚	3.348	0.650	0.017	2.681	4.606	5.039
法国	5.943	0.131	0.022	5.790	9.732	6.534
希腊	4.692	1.021	0.047	3.624	7.296	2.694
匈牙利	10.151	-1.911	0.197	11.865	19.061	10.130
冰岛	3.347	0.084	0.011	3.252	4.527	5.586
爱尔兰	5.743	-2.464	0.022	8.186	8.943	5.227
以色列	1.556	0.595	0.035	0.926	1.458	1.696
日本	2.504	0.333	0.024	2.147	3.402	2.842
韩国	3.921	-0.948	0.042	4.827	6.440	0.912
拉脱维亚	-8.446	3.325	0.021	-11.792	-15.755	-3.514
立陶宛	9.721	0.581	0.116	9.024	13.352	5.822
墨西哥	7.387	-0.298	0.014	7.670	11.750	8.589
荷兰	1.895	-0.347	0.033	2.208	3.084	-0.534
新西兰	5.759	0.266	0.024	5.468	9.521	6.612
挪威	3.882	-2.287	0.036	6.132	6.193	3.509
波兰	4.213	0.628	0.095	3.489	5.022	4.260
葡萄牙	4.876	0.187	0.023	4.666	8.479	4.890
斯洛伐克	4.250	0.444	0.108	3.699	5.691	2.517
斯洛文尼亚	5.158	-0.078	0.077	5.159	7.659	8.579
西班牙	3.214	0.399	0.021	2.794	4.786	2.653
瑞典	11.840	-0.528	0.090	12.278	21.423	12.732
瑞士	15.221	-1.250	0.114	16.356	25.224	17.388
土耳其	-8.833	1.865	0.093	-10.792	-12.792	-5.985
英国	2.330	0.688	0.018	1.625	2.743	3.023
美国	3.313	0.507	0.011	2.795	4.171	3.347
阿根廷	15.271	0.168	0.005	15.098	22.358	15.664
巴西	1.440	0.311	0.017	1.112	2.601	6.137
保加利亚	1.088	2.084	0.131	-1.127	1.475	2.173
<b>中国</b>	<b>3.965</b>	<b>-0.294</b>	<b>0.029</b>	<b>4.231</b>	<b>5.808</b>	<b>3.485</b>
克罗地亚	0.968	1.592	0.040	-0.663	0.369	0.670

(续)

国家	消费者福利变化	间接效应		直接效应	不使用中间投入品的消费者福利变化	不考虑投入产出关联的消费者福利变化
		贸易条件效应	贸易量效应			
印度	4.935	0.768	0.032	4.136	7.315	3.423
印度尼西亚	5.737	-0.109	0.061	5.785	7.270	7.834
马来西亚	2.988	-1.191	0.117	4.061	5.851	-0.362
马耳他	1.773	1.183	0.020	0.570	0.617	6.613
秘鲁	4.447	-0.053	0.043	4.457	5.435	5.226
菲律宾	6.281	0.533	0.049	5.699	8.287	8.063
罗马尼亚	4.189	0.667	0.049	3.473	4.614	3.920
俄罗斯	4.319	-1.376	0.107	5.588	5.331	-0.198
沙特阿拉伯	-3.454	-1.326	-0.008	-2.119	-2.590	-7.210
新加坡	3.332	-1.169	0.077	4.425	4.970	-3.140
南非	2.312	0.157	0.043	2.111	3.411	2.602
泰国	7.444	-0.238	0.238	7.445	12.391	5.655
突尼斯	8.000	0.430	0.067	7.503	14.542	11.092
越南	0.719	1.352	0.000	-0.633	-0.522	8.680

根据表3可以得出以下结论:

第一,大多数国家消费者福利提升,但上升幅度差异显著。智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯消费者福利下降,中国消费者福利上升幅度3.97%。针对该结论,本文给出以下经济学解释:

首先,由福利分解可知,工业机器人主要通过直接效应影响消费者福利,2014~2020年,世界各国逐渐重视工业机器人技术的发展,各国工业机器人使用程度大都上升,导致产出显著上升,同时生产成本下降,消费者福利显著上升。但不同国家工业机器人使用程度变化幅度存在较大差异,导致不同国家的直接效应显著不同。

同时,本文给出2014~2020年智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯工业机器人使用程度的变化幅度,如表4所示:

国家	智利	拉脱维亚	土耳其	沙特阿拉伯
工业机器人使用程度变化幅度	-8.929	-25.641	-25.207	-1.492

根据表4,智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯的工业机器人使用程度变化幅度均为负<sup>①</sup>,即2014~2020年,这些国家工业机器人使用程度均在下降。为进一步证实工业机器人使用程度与消费者福利的正向关系,本文反事实模拟智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯工业机器人使用程度下降对其消费者福利的影响,如下图:

<sup>①</sup> 智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯的工业机器人使用程度下降主要原因是其2014~2020年工业机器人运营库存量上升幅度较小。

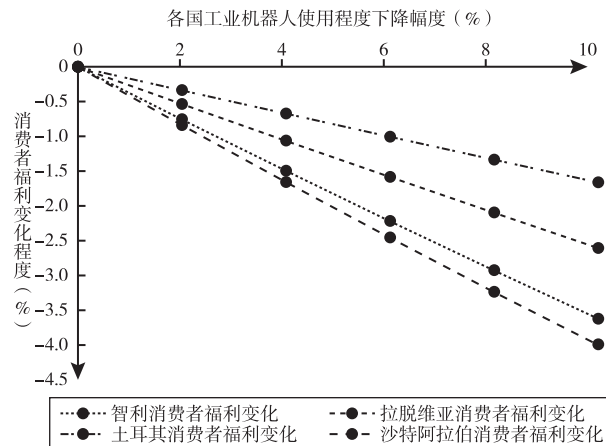


图2 所选国家工业机器人使用程度下降对该国消费者福利的影响

由图2可知,所选国家工业机器人使用程度下降导致其消费者福利受损。因此,国家消费者福利与工业机器人使用程度变化大致呈正相关关系。

其次,各国工业机器人使用程度变化也将通过贸易条件效应影响消费者福利,因为在投入产出关联背景下,本国使用工业机器人将影响本国出口品价格,他国使用工业机器人将影响本国进口品价格,改变贸易条件效应,但各国贸易条件效应作用方向各异。英国、美国等大多国家贸易条件效应均得到改善,而中国贸易条件效应下降0.29%,中国出口品价格相对于进口品价格下降,即中国从国际贸易中获得的收入减少,将恶化本国消费者福利。

此外,各国工业机器人使用程度变化也将影响贸易量效应,由福利分解可知,各国贸易量效应均为正,只有沙特阿拉伯和智利的贸易量效应下降。因为2014~2020年工业机器人使用程度变化,工业机器人使用程度上升,生产成本降低,各国出口产品价格降低,消费者能以更为低廉的价格进口他国产品,各国进口额大都上升。而开放框架下,进口产品数量的提升将改善居民消费,改善贸易量效应,对消费者福利有着正向影响。

总体而言,工业机器人使用程度变化对世界各国消费者福利的影响取决于直接效应、贸易条件效应和贸易量效应的权衡,直接效应为正且占据主导地位,且不同国家的变化幅度存在差异。

第二,若不考虑中间品,世界各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过40%;若不考虑投入产出关联,世界各国消费者福利变化幅度大都超过10%。

除此之外,本文探究不同模型下工业机器人使用程度变化对消费者福利的影响:第一,生产过程中不使用中间品的模型,在不考虑中间投入品情形下,生产过程中并不使用中间投入品进行生产,即 $\gamma_n^i = 1$ ,此时,总产出与增加值相等。第二,生产过程不考虑投入产出关联的模型,在不考虑投入产出关联情形下,生产过程中需要使用中间投入品,即 $\gamma_n^i < 1$ ,保持基础情形的增加值份额不变,本文将投入产出系数矩阵的非对角线元素清零,生产商仅能使用来自其经营的同一行业的中间品,即 $\gamma_n^{i,j} = 1 - \gamma_n^i$ 。

由上述量化分析结果可知,不考虑中间投入品和投入产出关联对世界各国消费者福利都有较大影响。其中,若不考虑中间投入品,中国消费者福利变化5.81%,与基准情形差值幅度大

约在70%左右,世界各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过40%。若不考虑投入产出关联,中国消费者福利变化3.49%,与基准情形差值幅度大约在12.09%左右,世界各国消费者福利变化幅度大都超过10%。在不考虑中间投入品的情形下,厂商生产过程中仅需劳动力一种要素,工业机器人将直接替代劳动力进行生产,忽略中间投入品这一生产要素将高估工业机器人对消费者福利的影响。而在不考虑投入产出关联的情形下,厂商在生产过程中仅需要劳动力和本国本部门生产的中间品,生产过程中使用本国本部门中间品进行生产的设定,弱化了其他国家或其他部门使用工业机器人降低成本,进而通过投入产出关联降低中国部门进口中间品成本所带来的福利效应。因此,“不考虑中间投入品”情形下的福利效应基本大于基准情形,而“不考虑投入产出关联”情形下的福利效应较小。但上述两种建模方式,均不能反映现实生产情形,因此,在量化工业机器人的经济效应时,考虑投入产出关联尤为重要。

### 五、反事实分析

接下来,本文将模拟不同情形下工业机器人的福利效应,为政策选择提供理论和量化依据。本文主要考虑以下两种反事实模拟:首先,中国工业机器人密度排名较低,相较于发达国家还存在一定的差距,因此,本文将模拟中国工业机器人使用程度上升10%的福利效应;其次,作为彼此最大的贸易伙伴之一,中美经贸关系一直被视为两国关系的“压舱石”与“推进器”,两国间双边贸易发展备受瞩目(谭莹等,2022;杨曦和徐扬,2022),对于全球经济稳定、各国经济发展具有深远影响。因此,本文将研究视角聚焦于中美两国,分别反事实模拟美国工业机器人使用程度上升以及中国为应对此问题而如何调整工业机器人使用程度,这不仅为中国应对他国工业机器人使用程度变化提供量化依据,更为各国政府制定相关政策提供理论依据。

#### (一)中国工业机器人使用程度上升10%的福利效应

根据图3可以得出以下结论:

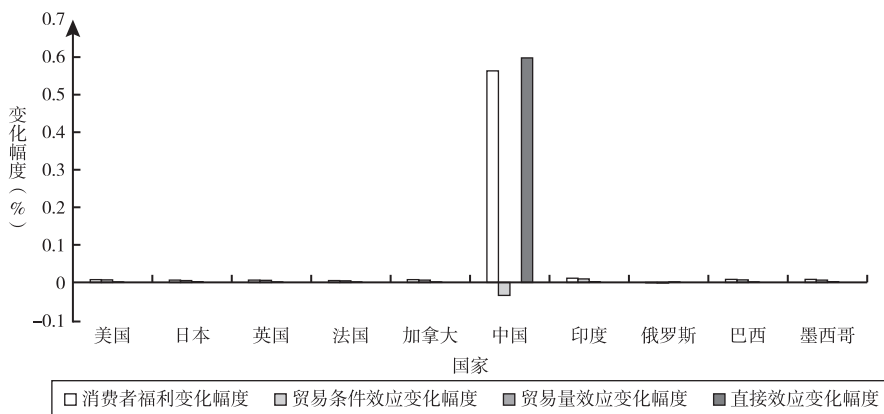


图3 中国工业机器人使用程度上升10%对部分国家消费者福利的影响<sup>①</sup>

相较于基础情形,中国工业机器人使用程度上升10%,导致中国消费者福利上升幅度最大,大部分国家消费者福利上升,仅奥地利等12个国家消费者福利下降,但其下降幅度较小,世界各国消

<sup>①</sup> 囿于篇幅,本文中反事实情形仅呈现部分经济体结果,详见附录E。

费者福利平均上升0.01%，其中，中国消费者福利变化0.54%。针对该结论，本文给出经济学解释如下：

中国工业机器人使用程度上升10%，中国消费者福利上升幅度最大，直接效应起主导作用，产出上升且生产成本下降，消费者福利提升。而中国的贸易量效应却遭恶化，因为中国工业机器人使用程度上升，生产成本降低，本国产品价格下降。相较于进口他国产品，消费者更愿意以更为低廉的价格购买本国产品，导致本国进口额下降。此外，中国的贸易条件效应也下降，因为使用工业机器人后，生产成本降低，出口产品价格降低，但中国出口品价格相对于进口品价格下降幅度更大，将恶化中国贸易条件效应。但直接效应和贸易条件效应的福利改善程度大于贸易量效应导致的福利下降程度，中国消费者福利整体仍上升。

作为全球价值链的枢纽国，中国工业机器人使用程度上升主要通过贸易量效应和贸易条件效应影响他国消费者福利。中国工业机器人使用程度上升，生产成本下降，中国出口产品价格降低，他国对中国产品的进口需求增加，进而增加他国的进口额，改善世界其他国家的贸易量效应；但不同国家贸易条件效应变化方向并不一致，中国出口价格降低后，将削弱部分国家出口产品价格优势，导致这些国家从国际贸易中获得的收入减少，进而恶化其贸易条件效应。因此，他国消费者福利的变化取决于贸易量效应与贸易条件效应的权衡，奥地利等12个国家的消费者福利下降是因为中国工业机器人使用程度上升导致贸易条件效应恶化程度大于贸易量效应改善程度。

本文还呈现了中国工业机器人使用程度上升2%、4%、6%、8%和10%时，中国消费者福利和世界其他经济体消费者福利变化的平均值的变化的趋势。

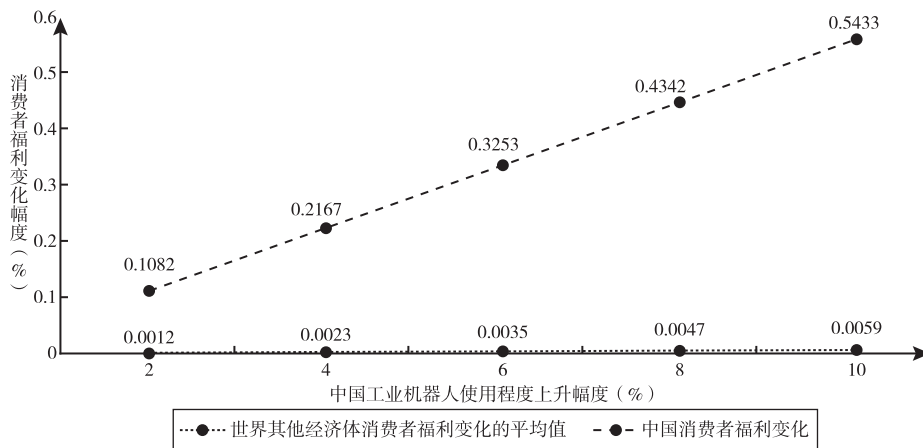


图4 中国工业机器人使用程度上升对中国及世界其他经济体消费者福利的影响

## (二)美国工业机器人使用程度上升10%的福利效应

根据图5可以得出以下结论：

相较于基础情形，美国工业机器人使用程度上升，美国消费者福利上升最大，较多国家消费者福利下降，世界各国消费者福利平均下降0.02%，其中，中国消费者福利下降0.10%。针对该结论，本文给出经济学解释如下：

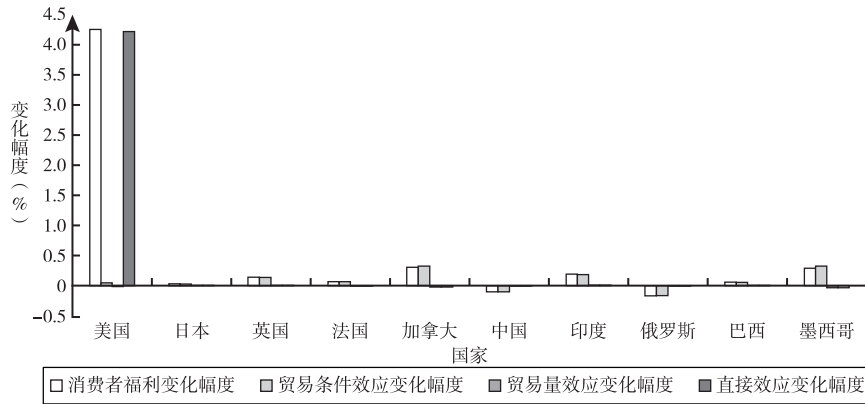


图5 美国工业机器人使用程度上升10%对部分国家消费者福利的影响<sup>①</sup>

与中国工业机器人使用程度上升原理相似,美国工业机器人使用程度上升主要通过直接效应提升美国消费者福利,但美国工业机器人使用程度上升将恶化大多数国家消费者福利。美国工业机器人使用程度上升虽然导致出口产品价格降低,他国对美国产品的进口需求增加,改善世界其他国家的贸易量效应,但也将削弱他国出口产品价格优势,导致这些国家从国际贸易中获得的收入减少,贸易条件效应同样遭受恶化。由于美国作为发达国家,与世界各国的贸易往来更为密切,成本降低后,将会导致更多的国家贸易条件效应受损,因此,美国工业机器人使用程度上升10%,世界各国消费者福利平均下降0.02%,远小于中国工业机器人幅度提升的世界贡献。

值得强调的是,中国工业机器人使用程度上升将改善美国贸易条件效应,而美国工业机器人使用程度上升将恶化中国贸易条件效应,造成这一差异的主要原因是中美要素禀赋和生产结构的不同。中美要素禀赋和生产结构的不同将导致中美两国生产过程中所需来自各国的中间品的数量不同,此外,贸易成本的不同也将导致中美两国生产过程中所需来自各国中间品的价格不同,因此,不同情形下中美两国进出口产品价格发生差异化变动,进而产生异质性影响。中国工业机器人使用程度上升将改善美国贸易条件效应,说明中国工业机器人使用程度上升后,美国出口品价格下降幅度小于进口品价格下降幅度,这意味着美国从中国进口产品较多,且中国对美国的挤占效应较小。而美国工业机器人使用程度上升,中国贸易条件效应恶化,则说明中国出口品价格下降幅度大于进口品价格下降幅度,这意味着美国工业机器人降低成本后,虽然降低了中国进口品价格,但是也对中国的贸易产生较大的挤占效应,使其出口需求下降,进而导致中国出口品价格下降幅度较大,恶化了中国的贸易条件效应<sup>②</sup>。

本文还呈现了美国工业机器人使用程度上升2%、4%、6%、8%和10%时,美国、中国消费者福利的变化以及世界其他经济体消费者福利变化的平均值。

<sup>①</sup> 囿于篇幅,本文中反事实情形仅呈现部分经济体结果,详见附录F。

<sup>②</sup> 一国的挤占效应主要表现为该国在各国国际市场中所占份额(可以用该国在世界各国所占的贸易份额的平均值表示)。为此,本文计算了中国工业机器人使用程度上升和美国工业机器人使用程度上升对中美两国在世界各国所占贸易份额的平均值的变化幅度,分析发现,中国工业机器人上升10%引致美国在世界各国所占的贸易份额的平均值下降0.03%。而美国工业机器人使用程度上升10%导致中国在世界各国所占的贸易份额的平均值下降0.33%,即中国工业机器人使用程度上升对美国的挤占效应小于美国工业机器人使用程度上升对中国的挤占效应。

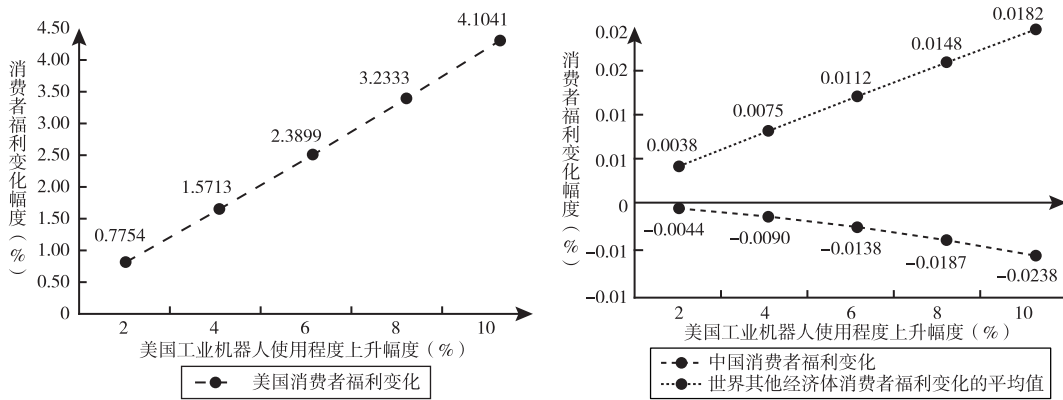


图6 美国工业机器人使用程度上升对消费者福利的影响

(三)中国工业机器人的对冲作用

此外,为进一步探究如何应对美国工业机器人使用程度上升对中国消费者福利的负面影响,本文将反事实模拟中国工业机器人使用程度上升对其负面影响的对冲作用,以更好地应对中国可能面临的他国工业机器人使用程度上升的潜在挑战,为促进中国消费者福利提升提供理论依据。

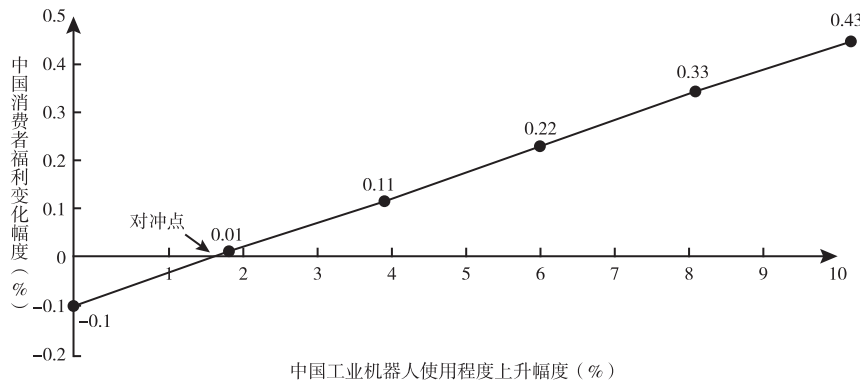


图7 中国工业机器人使用程度上升对美国工业机器人使用程度上升10%的对冲作用

由上图可知,美国工业机器人使用程度上升10%会对中国消费者福利带来负面影响,而中国工业机器人使用程度上升1.86%即可抵消美国工业机器人使用程度上升10%对中国所带来的负面影响。针对该结论,本文给出经济学解释如下:

美国工业机器人使用程度上升10%将通过贸易条件效应和贸易量效应恶化中国消费者福利,导致中国消费者福利下降。面对这一情形,中国可以提升本国工业机器人使用程度,以降低生产成本,增强中国出口产品价格优势。此外,中国工业机器人使用程度上升将促使更多的工业机器人替代劳动力进行生产,单位任务所需劳动数目下降,被替代的劳动力可以继续完成其他任务的生产,将通过生产率效应大幅提升产出,促使中国消费者福利显著提升,以抵消美国工业机器人使用程度上升所带来的负面影响。



## 六、结论与政策建议

本文基于 Caliendo 和 Parro(2015)模型,在生产侧纳入工业机器人,构建多国多行业的理论模型,量化并评估开放背景下工业机器人的福利效应,研究工业机器人对不同国家消费者福利的影响。

本文研究表明:2014~2020年,工业机器人导致大部分所选国家消费者福利上升,消费者福利变化取决于直接效应和间接效应的权衡,间接效应又分为贸易条件效应和贸易量效应,其中,直接效应占主导作用,仅有智利、拉脱维亚、土耳其和沙特阿拉伯的消费者福利有所下降。其中,中国消费者福利上升3.97%左右。

若不考虑中间投入品,世界各国消费者福利变化幅度与基准情形差别大都超过40%。若不考虑投入产出关联,世界各国消费者福利变化幅度大都超过10%。

反事实分析发现,中国消费者福利随工业机器人使用程度上升而增加,当中国工业机器人使用程度上升10%时,中国消费者福利上升0.54%,世界各国消费者福利平均上升0.006%;若美国工业机器人使用程度上升10%,世界上较多国家消费者福利下降,其中,中国消费者福利下降0.10%,世界各国消费者福利平均下降0.02%。而中国工业机器人使用程度上升1.86%即可抵消美国工业机器人使用程度上升10%对中国消费者福利造成的负面影响。

根据本文研究结果,提出以下政策建议。

第一,深化工业机器人应用实践,提升工业机器人使用程度。根据本文结论,工业机器人应用对中国消费者福利的提升作用毋庸置疑。中国工业机器人使用程度上升不仅能够提升自身消费者福利,而且能够促使全球消费者福利提升。因此,中国政府有必要加速拓展工业机器人应用深度,促使中国工业机器人使用程度上升,让更多群体和更多国家共享工业机器人所带来的正向效应。而当前中国工业机器人产业快速蓬勃发展,已进入重要窗口期。在这样的背景下,中国工业机器人产业应增强产业创新能力,提高技术水平和发挥产品优势,夯实产业基础,开创新兴领域长板,不断提高工业机器人的使用程度,增强工业机器人产业的核心竞争力,为促进消费者福利提升发挥更大助力,推动经济社会的持续发展。同时,政府可以加强对工业机器人应用领域的政策支持和产业政策引导,促进机器人在多个重要领域广泛应用,通过加速拓展工业机器人使用程度,为提升消费者福利、推动经济社会的发展发挥重要作用,实现经济转型升级和可持续发展的目标。

第二,关注世界工业机器人发展趋势,强化工业机器人国际竞争力。根据本文结论,美国工业机器人使用程度上升将导致中国消费者福利下降。中国虽已跃居全球第一大工业机器人市场,但工业机器人产业的应用深度与发达国家仍存在差距,且中国在国际舞台上的行动和策略能够显著影响全球工业机器人的发展趋势和应用格局,为了在这场全球竞争中保持和提升自身地位,中国需要采取一系列以外向型发展为核心的战略措施。首先,中国应加强对国际工业机器人发展趋势的研究和监测,及时了解和掌握最新的技术动态和发展趋势,为工业机器人产业的发展深化提供重要参考。其次,中国要加强与其他国家在工业机器人领域的交流,建立多边合作机制,借鉴和吸收国际先进技术和经验,提升工业机器人产业的应用深度和国际竞争力,筑牢中国在工业机器人领域的领先地位,以积极防范美国及全球其他国家工业机器人技术提升对中国消费者福利可能造成的负面影响。

第三,密切促进国际合作,缩小全球福利增长差距。根据本文结论,工业机器人应用深化对各

国的福利影响呈现明显的异质性,部分发展中国家由于工业机器人租金等诸多限制,未能充分利用工业机器人,致使其福利受损。因此,中国应发挥负责任大国作用,关注世界各国消费者福利,积极发起以加速工业机器人应用为主题的国际合作,与世界各国分享其在工业机器人部署与运维等方面的宝贵经验与成果,共同探索工业机器人的新应用领域和创新模式,在进一步巩固和提升中国在国际工业机器人领域的领先地位的同时,促进全球工业机器人行业的健康发展,形成“众人拾柴火焰高”的良好局面,助推他国工业机器人使用程度上升,实现互利共赢。

特别地,中国可以进一步加强与共建“一带一路”国家的合作,进一步推动工业机器人的广泛应用。具体而言,中国可以在不同细分市场上开展合作,针对各国的实际需求和产业特点,共同打造以中国为主导的、多方共赢的工业机器人应用体系,推动各国的经济发展和产业升级。因此,加强与共建“一带一路”国家的合作,共同推动工业机器人的发展和应用,具有重要的战略意义和深远的影响。

### 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,2022,57(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,2019,54(7):47~63.
- [3]程文.人工智能、索洛悖论与高质量发展:通用目的技术扩散的视角[J].经济研究,2021,56(10):22~38.
- [4]何小钢,刘叩明.机器人、工作任务与就业极化效应——来自中国工业企业的证据[J].数量经济技术经济研究,2023,40(4):52~71.
- [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]孔高文,刘莎莎,孔东民.机器人与就业——基于行业与地区异质性的探索性分析[J].中国工业经济,2020,(8):80~98.
- [7]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,2023,39(10):41~59.
- [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,2023,46(1):121~145.
- [9]林晨,陈小亮,陈伟泽,陈彦斌.人工智能、经济增长与居民消费改善:资本结构优化的视角[J].中国工业经济,2020,(2):61~83.
- [10]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,2020,37(10):24~44.
- [11]刘涛雄,潘资兴,刘骏.机器人技术发展对就业的影响——职业替代的视角[J].科学学研究,2022,40(3):443~453.
- [12]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.
- [13]吕越,谷玮,尉亚宁,包群.人工智能与全球价值链网络深化[J].数量经济技术经济研究,2023,40(1):128~151.
- [14]谭莹,李昕,杨紫,张勋.加征关税如何影响中国劳动力市场[J].世界经济,2022,45(9):32~56.
- [15]王林辉,胡晟明,董直庆.人工智能技术、任务属性与职业可替代风险:来自微观层面的经验证据[J].管理世界,2022,38(7):60~79.
- [16]王书斌.工业智能化升级与城市层级结构分化[J].世界经济,2020,43(12):102~125.
- [17]王晓娟,朱喜安,王颖.工业机器人应用对制造业就业的影响效应研究[J].数量经济技术经济研究,2022,39(4):88~106.

- [18]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.
- [19]魏下海,张沛康,杜宇洪.机器人如何重塑城市劳动力市场:移民工作任务的视角[J].经济学动态,2020,(10):92~109.
- [20]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.
- [21]杨曦,徐扬.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),2022,22(2):703~726.
- [22]郑丽琳,刘东升.机器人应用与劳动力就业:替代还是互补?——基于22个经济体数据的经验分析[J].统计研究,2023,40(3):126~138.
- [23]周广肃,丁相元.工业机器人应用对城镇居民收入差距的影响[J].数量经济技术经济研究,2022,39(1):115~131.
- [24]Acemoglu D., Loebbing J., 2022, *Automation and Polarization* [R], NBER Working Paper, No. 30528.
- [25]Acemoglu D., Restrepo P., 2018a, *Low-Skill and High-Skill Automation* [J], *Journal of Human Capital*, 12(2), 204~232.
- [26]Acemoglu D., Restrepo P., 2018b, *The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment* [J], *American Economic Review*, 108(6), 1488~1542.
- [27]Acemoglu D., Restrepo P., 2019a, *Artificial Intelligence, Automation, and Work* [A], in Agrawal A., Gans J., Goldfarb A., eds., *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda* [C], Chicago: University of Chicago Press, 197~236.
- [28]Acemoglu D., Restrepo P., 2019b, *Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor* [J], *Journal of Economic Perspectives*, 33(2), 3~30.
- [29]Acemoglu D., Restrepo P., 2020, *Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets* [J], *Journal of Political Economy*, 128(6), 2188~2244.
- [30]Acemoglu D., Restrepo P., 2022, *Demographics and Automation* [J], *Review of Economic Studies*, 89(1), 1~44.
- [31]Artuc E., Bastos P., Copestake A., Rijkers B., 2022, *Robots and Trade: Implications for Developing Countries* [A], in Ing L. Y., Grossman G. M., eds., *Robots and AI: A New Economic Era* [C], London: Routledge.
- [32]Artuc E., Bastos P., Rijkers B., 2023, *Robots, Tasks, and Trade* [J], *Journal of International Economics*, 145, 103828.
- [33]Bonfiglioli A., Crinò R., Gancia G., Papadakis I., 2022, *Robots, Offshoring and Welfare* [A], in Ing L. Y., Grossman G. M., eds., *Robots and AI: A New Economic Era* [C], London: Routledge.
- [34]Cali M., Presidente G., 2021, *Automation and Manufacturing Performance in a Developing Country* [R], World Bank Policy Research Working Paper, No. 9653.
- [35]Caliendo L., Parro F., 2015, *Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA* [J], *Review of Economic Studies*, 82(1), 1~44.
- [36]Damiani M., Pompei F., Kleinknecht A., 2020, *When Robots Do (not) Enhance Job Quality: The Role of Innovation Regimes* [R], MPRA Paper from University Library of Munich, Germany.
- [37]Domini G., Grazi M., Moschella D., Treibich T., 2022, *For Whom the Bell Tolls: the Firm-Level Effects of Automation on Wage and Gender Inequality* [J], *Research Policy*, 51(7), 104533.
- [38]Dekle R., Eaton J., Kortum S., 2007, *Unbalanced Trade* [J], *American Economic Review*, 97(2), 351~355.
- [39]Eaton J., Kortum S., 2002, *Technology, Geography, and Trade* [J], *Econometrica*, 70(5), 1741~1779.
- [40]Egger P., Larch M., Nigai S., Yotov Y., 2021, *Trade Costs in the Global Economy: Measurement, Aggregation and Decomposition* [R], WTO Staff Working Paper, No. ERSD-2021-2.

- [41] Frey C. B., Osborne M. A., 2017, *The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation?* [J], *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254~280.
- [42] Fujiwara I., Zhu F., 2020, *Robots and Labour: Implications for Inflation Dynamics* [R], BIS Working Paper, No. 111.
- [43] Gordon R. J., 2016, *Perspectives on the Rise and Fall of American Growth* [J], *American Economic Review*, 106 (5), 72~76.
- [44] Graetz G., Michaels G., 2018, *Robots at Work* [J], *Review of Economics and Statistics*, 100 (5), 753~768.
- [45] Gries T., Naudé W., 2018, *Artificial Intelligence, Jobs, Inequality and Productivity, Does Aggregate Demand Matter?* [R], IZA Discussion Papers, No. 12005.
- [46] Hallward-Driemeier M., Nayyar G., 2019, *Have Robots Grounded the Flying Geese?: Evidence from Greenfield FDI in Manufacturing* [R], World Bank Policy Research Working Paper, No. 9097.
- [47] Kumar K. N., Balaramachandran P. R., 2018, *Robotic Process Automation—a Study of the Impact on Customer Experience in Retail Banking Industry* [J], *Journal of Internet Banking and Commerce*, 23 (3), 1~27.
- [48] Hémos D., Olsen M., 2022, *The Rise of the Machines: Automation, Horizontal Innovation, and Income Inequality* [J], *American Economic Journal: Macroeconomics*, 14 (1), 179~223.
- [49] Leduc S., Liu Z., 2019, *Robots or Workers?: A Macro Analysis of Automation and Labor Markets* [R], Federal Reserve Bank of San Francisco Working Paper, No. 2019-17.
- [50] Stapleton K., Webb M., 2020, *Automation, Trade and Multinational Activity: Micro Evidence from Spain* [R], CSAE Working Paper, No. 2020-16.
- [51] Stemmler H., 2023, *Automated Deindustrialization: How Global Robotization Affects Emerging Economies—Evidence from Brazil* [J], *World Development*, 171, 106349.
- [52] Susskind D., 2017, *A Model of Technological Unemployment* [R], Department of Economics Discussion Paper Series/ University of Oxford, No. 819.
- [53] Vermeulen B., Pyka A., Saviotti P., 2020, *Robots, Structural Change, and Employment: Future Scenarios* [A], in Zimmermann K. F. ed., *Handbook of Labor, Human Resources and Population Economics* [C], Cham, Switzerland: Springer, 1~37.

## **Industrial Robots, Input–output Linkage and Consumer Welfare: Quantitative Analysis Based on an Open Framework**

MAO Haitao<sup>1</sup> YANG Canyu<sup>1</sup> ZHANG Jie<sup>2</sup>

(1.School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law;

2.School of Economics, Nankai University)

**Summary:** Driven by both market demand and technological innovation, the field of artificial intelligence centered on industrial robots has achieved rapid development and become the focus of strategic games among countries worldwide. As a strategic technology, the development and application of industrial robots will affect productivity and industrial scale through productivity and substitution effects and affect the trade pattern through terms of trade effect profoundly. Therefore, it is crucial to clarify the impact mechanism of industrial robots on consumer welfare from the perspective of optimization worldwide, exploring their economic effects and promoting consumer welfare. The Chinese government should also initiate and adjust policies related to industrial robots to help boost consumer welfare. With

the acceleration of globalization, the deepening of the international division, the increasing level of specialization, and the increasingly close economic ties between various industries in various countries, the use of industrial robots in an industry in a country not only directly affects the price of products in the industry in the country but also indirectly affects the production costs of other industries in the country and other countries through the export of intermediate goods. Thus, changes in consumer welfare worldwide are influenced by both the use of industrial robots and the strength of international input-output linkages. In the context of international input-output linkages, how does the change in the use of industrial robots in China affect consumer welfare worldwide? How much has consumer welfare changed? How much does the change in the use of industrial robots in other countries affect Chinese consumer welfare? What measures can China take to counteract this external shock? This study attempts to answer these questions.

This study constructs a theoretical model that includes both industrial robots and input-output linkage. Moreover, it decomposes the welfare effects of industrial robots into direct and indirect effects for the first time, where the indirect effects include terms of trade effects and trade volume effects; estimates exogenous parameters such as the substitution of labor by industrial robots and input-output coefficients; and quantitatively analyzes the welfare effects of industrial robots. Our results reveal that (1) changes in the substitution of labor by industrial robots in 2014 and 2020 led to an increase in consumer welfare in most countries, with Chinese consumer welfare rising by 3.97% and the productivity effects dominating. (2) If the substitution of labor by industrial robots in China increases by 10%, Chinese consumer welfare will increase by 0.54%, and consumer welfare worldwide will increase by an average of 0.0059%. (3) If the substitution of labor by industrial robots in the United States increases by 10%, Chinese consumer welfare will drop by 0.10%, and consumer welfare worldwide will decrease by an average of 0.0201%. (4) An increase in the substitution of labor by industrial robots in China by 1.86% can offset the negative impact of the substitution of labor by industrial robots in the United States and decrease Chinese consumer welfare.

The results have several policy implications. First, an increase in the use of industrial robots in China not only enhances its own consumer welfare but also benefits global consumers. Thus, the Chinese government must accelerate the expansion of the application of industrial robots, promote the use of industrial robots in China, and let more groups and countries share the achievements of industrial robot development. Second, an increase in the use of industrial robots in the United States will lead to a decrease in consumer welfare in China. China should strengthen the independent innovation of industrial robots and enhance the use of industrial robots to improve its international competitiveness in this field and build a solid leading position. Third, the use of industrial robots has a noticeably heterogeneous impact on the welfare of different countries. Thus, China should act as a major country, pay attention to the consumer welfare of countries worldwide, promote international cooperation, and foster the use of industrial robots in other countries.

**Keywords:** Industrial Robots; Consumer Welfare; Input-output Linkage

**JEL Classification:** F14; D57

(责任编辑:许雪晨)