

工业机器人应用、工资收入差距 与制造业产品品质升级*

王启超¹ 罗连发²

(1. 首都经济贸易大学经济学院, 北京 100070;

2. 武汉大学质量发展战略研究院, 湖北 武汉 430072)



内容提要:当前,工业机器人技术与制造业生产体系深度融合,为中国制造产品品质升级带来前所未有的契机,然而,工业机器人应用如何影响产品品质有待进一步研究。本文从工资收入差距的需求侧角度,从理论层面考察了工业机器人应用与工资收入差距变化及产品品质需求升级的内在关联机制,并利用中国企业-劳动力匹配调查数据进行实证检验,考察工业机器人应用对制造业产品品质升级的影响。研究发现,工业机器人应用会显著促进制造业产品品质升级,基于多种方法的检验均证实这一结论具有稳健性。机制检验结果表明,工业机器人应用通过缩小性别工资收入差距(而不是技能工资收入差距),进而从需求侧拉动产品品质提升,这种正向提升效果受到人口规模及厂商固定成本的调节。当人口规模较大、厂商固定成本较低时,工业机器人应用对产品品质的提升效果更明显。在任何条件下,收入差距基尼系数的扩大都会降低产品品质。本文的研究发现为促进中国制造产品品质升级打开新思路,也为企业主动通过智能化实现转型升级提供科学支撑。

关键词:工业机器人应用 产品品质 工资收入差距 需求侧

中图分类号:F273.2;F424.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2025)08—0022—18

一、引言

近年来,工业智能化技术作为提高生产效率的有效手段和推动高质量发展的“关键技术”,已被纳入国家战略规划。在新一轮智能化技术变革的浪潮中,中国不仅跟上了时代潮流,而且在某些领域已经处于世界前列。《2024年世界机器人报告》指出,中国是世界上机器人应用量最多的国家,机器人存量占全球41%。即使在新冠疫情影响下的2020年,中国的工业机器人安装量也增长了20%(易苗等,2024)^[1]。智能化技术的广泛应用为制造业产品品质升级带来了新的机遇。在生产端,机器人应用可以显著提升生产效率和产品质量的稳定性,实现高度精细化生产,如小型电子元件的精细处理和组装、汽车部件的精密焊接以及金属产品的精确切割等(DeStefano和Timmis, 2024)^[2]。在需求端,工业机器人应用如何影响产品品质升级还有待进一步研究。

国内需求不足是我国经济发展较长时期以来比较突出的结构性问题。实际上,我国国内高端需求释放不足,一定程度上是由于中国制造产品品质难以令人满意,从而导致对高品质产品的需

收稿日期:2024-11-13

* 基金项目:国家社会科学基金一般项目“产业升级与共同富裕双重视角下的我国人工智能应用策略研究”(22BJL119)。

作者简介:王启超,男,讲师,硕士生导师,经济学博士,研究领域为经济增长理论与政策、数字经济等,电子邮箱:wangqichao@cueb.edu.cn;罗连发,男,副教授,硕士生导师,经济学博士,研究领域为产品质量规制政策、高质量发展的理论与政策等,电子邮箱:luo0708sky@163.com。通讯作者:罗连发。

求通过国外市场来满足。有研究测算发现,近年来国内产品需求指标对中国工业发展质量的贡献度下降,说明中国制造主要是解决了“有没有”的问题,但“好不好”的问题没有完全解决,高端核心产品依然面临“卡脖子”问题(史丹和李鹏,2019)^[3]。事实上,中国作为世界人口大国,拥有超过 14 亿的人口规模,在庞大人口基数的加持下,居民对高质量产品的潜在需求非常巨大,具备通过需求侧拉动产品品质升级的市场规模优势(扩大内需战略研究课题组,2023)^[4]。

本文从工资收入差距的需求侧角度,分析工业机器人应用对制造业产品品质升级的影响。基于“脑力—体力(brains-and-brawn)”模型(Welch,2000)^[5],本文在生产函数引入机器人资本,并且将劳动区分为体力劳动和脑力劳动,考察工业机器人应用对脑力—体力工资收入差距和性别工资收入差距的影响,从理论层面揭示工资收入差距变化影响产品品质需求升级的内在机制。进一步,利用 2018 年中国企业—劳动力匹配调查数据,实证检验工业机器人应用对制造业产品品质升级的影响,对两者间的因果关系进行了识别,验证了工业机器人应用影响产品品质升级的作用机制。使用较前沿的再中心化影响函数(recentered influence function, RIF)回归方法对机制检验进行补充,针对不同维度的异质性以及人口规模和固定成本的调节效应进行了拓展性分析。本研究为我国借助智能化技术变革改善收入分配差距,提升国内本土市场对高质量产品的需求,更好地发挥需求侧的关键作用,促进我国制造业产品品质升级提供新思路。

本文可能的边际贡献在于:第一,本文拓展了现有研究的深度,多数文献还停留在讨论工业机器人应用对劳动力工资和就业层面的影响,本文建立工业机器人应用与产品品质提升之间的理论联系,刻画工业机器人技术应用对劳动力工资收入差距与产品需求层次的传导机制,切合人工智能时代背景下我国制造业从规模扩张向品质升级转型的发展需要。第二,本文并未停留在工业机器人应用对制造业产品品质提升的影响上,而是在进一步分析工业机器人应用促进产品品质提升的作用机制,进而得到了新的发现,即工业机器人应用对产品品质提升的正向作用受居民人口规模和厂商固定成本的影响,其作用方向并不总是简单的正向提升作用。第三,政策建议的应用价值方面,本文提出注重发挥需求侧的关键作用,积极顺应智能化技术变革,兼顾质量升级与收入分配目标,将我国人口规模巨大的潜在优势转化为现实优势,对我国建设制造强国和产品质量强国更具有参考意义。

二、文献综述与研究假设

1. 文献综述

关于工业机器人应用与制造业产品质量的研究已经取得重要进展,这些前期成果为本文的研究奠定了坚实基础,但相关研究仍然存在一些有待完善的地方。

一是已有研究仍然停留在工业机器人应用的就业效应、收入分配效应,直接讨论机器人与产品品质的文献比较少。工业机器人作为智能化和自动化时代的重要发明,可以对重复劳动特征明显、劳动强度大的体力劳动进行替代,其应用的广泛程度已经成为衡量国家制造业竞争力的关键指标(王林辉等,2020)^[6]。当前研究的普遍观点是机器人技术将提高社会生产力,能够对经济增长带来积极影响,如果能合理利用人工智能技术的发展机遇,经济将获得稳步增长(Acemoglu and Restrepo, 2018)^[7]。以工业机器人为载体的人工智能能够通过反哺基础科学研究(王斌等, 2024)^[8]、创造新思想和激励创新的方式实现技术创新(陈彦斌等,2019)^[9],提升全要素生产率(杨光和侯钰,2020^[10];王启超和孙广生,2024^[11]),促进高质量就业和高质量增长(程文,2021)^[12],甚至可能带来爆炸式增长的经济“奇点”(Aghion 等,2018)^[13]。

工业机器人应用与自动化程度提升,会对劳动力市场产生结构性重塑效应。然而,现有文献关于工业机器人应用影响工资收入差距的作用机制尚未形成共识。概括而言,工业机器人应用会

扩大收入差距(王筱筱等,2023)^[14],或者驱动收入差距趋于稳态(Acemoglu和Restrepo,2020)^[15],或者缩小收入差距(许健等,2022)^[16]。工资收入差距主要来自企业内部(Deng等,2025)^[17],或者来自企业之间(陈东和姚笛,2022)^[18]。部分学者基于任务偏向模型发现,工业机器人主要替代低技能劳动力,减少低技能常规工作任务,进而降低该群体的工资收入(Autor,2015)^[19],同时,增加对高技能劳动力的需求,推高技能溢价,最终扩大收入差距(余玲铮等,2021)^[20]。然而,也有研究持相反观点,认为工业机器人应用会显著促进企业股利分配(孙健等,2025)^[21],降低基尼系数,实现共同富裕,尤其在企业内部,通过取代从事重复体力工作的女性劳动力,性别收入差距得以缩小(Deng等,2025)^[17]。此外,还有研究指出,工业机器人应用对工资收入差距的影响方向并不确定,跟劳动力替代弹性有关,在一定条件下,智能化可以促进包容性增长(杨飞和范从来,2020)^[22]。

二是既有文献通常把机器人作为一种生产技术,从供给侧影响产品品质,从需求侧角度进行分析的研究还比较少见。工业机器人被用于执行一系列需要高度准确的重复性任务(DeStefano和Timmis,2024)^[2],例如处理和组装小型电子元件、汽车零件的精密焊接以及在严格公差范围内的金属产品切割(Tilley,2017)^[23],能够克服传统工业生产方式总是存在一定比例废弃产品的缺陷,可以降低产品的瑕疵率(綦建红和张志彤,2022)^[24],实现高度精细化生产,促进企业出口产品质量升级(黄先海等,2023)^[25]。当然,“机器换人”也意味着更好的生产环境,可以降低劳动强度,提高生产效率,帮助劳动者实现更加体面的劳动(侯俊军等,2020)^[26]。在理论层面,由于智能技术变革影响的是一系列经济活动,而非简单的某个实体对机器人技术的应用,因此,理论研究逐步从局部均衡转向一般均衡的角度探讨机器人技术对国民经济的影响。

理论上,产品品质提升可以来自两方面:一方面是产品供给体系生产水平提高带来的推力,工业机器人应用将显著提升重复劳动任务的准确性和精度(Tilley,2017)^[23],例如切割、焊接和搬运(Frey和Osborne,2017)^[27];另一方面是产品品质需求结构升级带来的拉力(Yurko,2011)^[28];李世刚等,2018^[29]。近年来,伴随着中国扩大内需长效机制的建立,越来越多的文献开始从需求侧视角探讨如何充分利用我国本土超大市场规模优势推动消费需求升级(戴翔等,2022)^[30],然后通过居民消费结构升级带动出口产品质量的提升(蒋灵多等,2024)^[31]。提升产品质量的基本前提是准确量化质量水平,文献一般采用单价法、产品技术复杂度(施炳展和曾祥菲,2015)^[32]、需求信息推断法(Khandelwal,2010^[33];2013^[34])。值得一提的是Khandelwal建立的需求信息推断法,该方法假定消费者对于产品的需求只与产品的价格和品质有关,所以,只需要剔除价格因素,所得需求即为衡量产品品质的指标,该方法是目前应用最广泛的做法。

综上所述,鲜有研究讨论工业机器人应用影响产品品质的理论逻辑,也未从需求角度分析促进中国制造业产品品质升级的拉力。一方面,可能是由于同时考虑要素市场和产品市场,理论模型的复杂程度会增加;另一方面,可能是受到微观层面工业机器人数据可得性约束,已有文献的数据来源集中在中国海关数据库和上市公司数据,基于实地调查微观数据的实证研究还比较少。

2. 研究假设

(1)工业机器人应用对制造业产品品质升级的影响。产品品质是指产品满足消费需求特征和特性的总和,是产品“优劣”的信号(李坤望等,2014)^[35]。整体而言,提升产品品质可以从供给和需求两方面着手。就供给方面,工业机器人应用将显著提升重复性任务的准确性和精度,有效减少生产过程中的误差(Tilley,2017)^[23]。例如,激光切割可以精确切割到10微米(0.01毫米)以内。在生产和测试阶段,计算机辅助技术常与工业机器人结合使用,使生产者能够构建更精密的虚拟模型,并通过模拟测试进行检验。

根据凯恩斯主义需求创造供给的观点,消费者对高品质的产品存在需求,为了满足这种需求,获得更高的利润,厂商会提高产品品质。单个消费者对高品质产品的需求主要取决于工资收入水

平,但对整个市场而言,高品质需求在很大程度上取决于工资收入差距。工资收入差距缩小在一定程度上会刺激需求,因为意味着低收入群体的工资水平相对提高,而这部分群体通常具有较高的消费倾向,因此,市场需求增加;相反,如果工资收入差距扩大,那么市场需求将减小。因此,本文提出如下假设:

H₁:工业机器人应用对制造业产品品质提升有正向影响,并且是通过缩小工资收入差距的需求拉动机制促进制造业产品品质升级。

(2)工业机器人应用影响制造业产品品质升级的理论机制。基于 Welch“脑力一体力”模型^[5],本文将劳动划分为体力劳动和脑力劳动,分析工业机器人应用对脑力劳动和体力劳动者工资收入的非对称影响。通过构建内嵌 CES 生产函数的 C-D 生产函数,刻画机器人资本对不同技能劳动力的异质性影响。无论是简单任务还是复杂任务的执行,都遵循 CES 生产函数的形式,总产出的生产过程仍然沿用 C-D 函数形式。机器人资本作为新兴生产要素,与传统资本存在显著差异。它不仅能替代人类体力劳动,还能替代脑力劳动,与劳动形成高度替代关系。随着机器人资本的引入,部分劳动岗位被机器人取代,尤其是体力劳动密集型岗位。

$$Y = A(R^\rho + L_A^\rho)^{\beta/\rho} (K^\theta + L_B^\theta)^{(1-\beta)/\theta} \quad (1)$$

其中, R 表示机器人资本, L_A 、 L_B 分别表示肌肉密集型的体力劳动和大脑密集型的脑力劳动。其他字母的含义跟经济学常用字母含义一致。本文认为,要素之间替代弹性满足基本假设条件,机器人资本与体力劳动存在较高的替代弹性,而传统资本与脑力劳动存在较高的替代弹性。为了便于分析,假定市场上只有一种产品,并且产品价格标准化为 1。在完全竞争的劳动力市场条件下,当市场实现出清状态时,脑力劳动和体力劳动者的工资收入将由各自边际产品价值决定。

$$w_A = A\beta L_A^{\rho-1} (R^\rho + L_A^\rho)^{\beta/\rho-1} (K^\theta + L_B^\theta)^{(1-\beta)/\theta} \quad (2)$$

$$w_B = A(1-\beta)L_B^{\theta-1} (R^\rho + L_A^\rho)^{\beta/\rho} (K^\theta + L_B^\theta)^{(1-\beta)/\theta-1} \quad (3)$$

结果表明,机器人资本对体力劳动者工资收入的影响取决于参数 ρ 和参数 β 的相对大小。而机器人资本与脑力劳动在生产过程中是互补关系,这种互补性使得机器人技术应用越广泛,导致脑力劳动者工资溢价越明显。基于以上结果,可以计算脑力劳动与体力劳动者之间的相对工资收入(φ),发现相对工资收入是两种要素投入比例的函数。

$$\varphi = \frac{w_B}{w_A} = \frac{1-\beta}{\beta} \times \left[\frac{\left(\frac{R}{L_A}\right)^\rho + 1}{\left(\frac{K}{L_B}\right)^\theta + 1} \right] \times \frac{L_A}{L_B} \quad (4)$$

对式(4)求导,可以发现,在机器优先替代体力劳动,而传统资本优先替代脑力劳动的假设条件下,即 $\rho > 0, \theta < 1$,工业机器人应用越广泛,脑力劳动的相对需求越大,脑力劳动者工资溢价幅度也越大,即 $\partial\varphi/\partial R > 0$ 。

考虑到男性和女性在禀赋上的差异,本文进一步研究了机器人应用对性别工资差距的影响。在脑力认知方面,男性和女性并无显著差异,但在体力方面,男性通常更具优势。因此,在机器人资本替代体力劳动的背景下,男性劳动力在体力方面的优势逐渐减弱,而女性劳动力在脑力劳动方面的潜力得到更多发挥,即 $L_B^m = L_B^f, L_A^m > L_A^f$ 。劳动力的工资由其内在要素禀赋和劳动边际产品决定,因此,男性劳动力和女性劳动力的工资分别是 $w^m = w_A L_A^m + w_B L_B^m, w^f = w_A L_A^f + w_B L_B^f$ 。

进一步地,可以计算男性劳动力和女性劳动力的性别工资差距 ω 。

$$\omega = \frac{w^m}{w^f} = \frac{w_A L_A^m + w_B L_B^m}{w_A L_A^f + w_B L_B^f} \quad (5)$$

接下来,求性别工资差距 ω 对机器人资本 R 的偏导数可得:

$$\frac{\partial \omega}{\partial R} = \frac{L_B \frac{\partial \varphi}{\partial R} (L_A^f - L_A^m)}{(L_A^f + L_B^f \varphi)^2} < 0 \quad (6)$$

通过分析性别工资差距对机器人资本的偏导数,可以发现,随着机器人资本的增加,性别工资差距呈现缩小趋势。这是因为,机器人应用推动了脑力劳动者工资的上涨,而男性在体力劳动方面的优势被削弱,使得男性和女性劳动力之间的工资收入差距逐渐缩小。因此,本文提出如下假设:

H₂:工业机器人应用可以缩小性别工资收入差距(而非技能工资收入差距)。

(3)人口规模及厂商固定成本的调节效应。首先,在效用函数中引入产品品质维度,消费者追求效用最大化目标。产品品质越高,给消费者带来的效用就越大。本文参考李世刚等(2018)^[29]关于消费决策的假定,在预算约束条件下,消费者选择一单位某种质量水平的产品进行消费,在可行集内,消费者更偏好品质更高的产品。这一假设目的是保证消费决策的存在性和唯一性,并且可以对均衡进行比较静态分析,因为如果相邻质量水平的产品存在价格竞争,将导致无法证明均衡的存在性和唯一性。

工资收入差距缩小会导致市场对高品质产品的需求增加。设定收入服从对数正态分布,即处于高收入和低收入两端的个体比较少,而处于中间收入的个体占大多数。全部消费者的收入分布呈现橄榄型特点,这是对大样本微观个体收入分布的较好描述。在理论层面,这一设定也确实能够得到相关研究的支持。当收入分配状况得到优化时,中高收入群体的数量会逐步增多,而低收入群体的数量则会相应减少。在此情形下,倘若人口规模较为庞大或者生产的固定成本处于较低水平,那么便会产生充足的质量需求,从而能够覆盖高品质产品生产所需的固定成本,从需求侧产生拉力带动产品品质提升。值得说明的是,可以假定个体收入服从新的分布函数(比如帕累托分布、对数逻辑斯蒂分布等),重新检验收入差距缩小影响产品品质需求结论的稳健性。

厂商生产需要支付固定成本 F ,固定成本对于产品品质是非减函数,引进工业机器人智能化生产设备会增加厂商的固定成本。产品价格是产品品质的函数,给定产品品质 m 和需求函数 $q^d(p)$,厂商生产的产品品质决策方程如下:

$$\max \pi(m) = [p(m) - m] q^d(p) - c(m) \quad (7)$$

求解式(7),可得企业的最优定价 $p^*(m)$ 和最大化利润 $\pi^*(m)$ 。只有当 $\pi^*(m) \geq 0$ 时,企业才会进行生产。在全部厂商中,假设产品品质最高点的质量为 m^F ,满足利润最大化的定价为 $p^F(m)$,产品需求量为 $N[1 - F(p^F)]$ 。品质最高点厂商的利润为:

$$\pi^F(m^F) = (p^F - m^F)N[1 - F(p^F)] - c(m^F) \quad (8)$$

式(8)对 m 求导可得:

$$\frac{\partial \pi^F}{\partial m} = -N[1 - F(p^F)] - \frac{\partial c}{\partial m} < 0 \quad (9)$$

式(9)表明, $\pi^F(m)$ 是 m 的单调减函数,利润和产品品质呈现反向变动关系。在产品品质极高的点,由于生产工艺复杂度和原材料标准要求极高,导致单位生产成本很高;同时,消费者数量极少,销量难以覆盖固定成本分摊,因此,该处厂商的利润为负。当产品品质 m 适度下调,厂商的生产成本会下降,消费者数量也会逐渐变多,此时利润会先由负变成零,最终再变成正数。

最后,市场均衡。给定外生的人口规模参数、消费者收入分布函数和厂商固定成本水平,市场

上只有一种产品但产品品质存在差异,这些产品呈现出连续的品质谱系分布。当经济处于均衡状态时,存在一组产品,产品品质分布为集合 $\{m_i^*\}_{i=1}^M$,市场出清价格为 $\{p_i^*\}_{i=1}^M$,均衡产量为 $\{q_i^*\}_{i=1}^M$,满足以下条件:①产品品质分布满足完备性与传递性,品质分布的集合满足 $0 \leq m_1^* < \dots < m_i^* < \dots < m_M^*$ 。②产品的最低价格高于企业的可变成本。③需求量 q_i^d 满足:如果 $i \leq M-1$,那么 $q_i^d = N[F(p_{i+1}) - F(p_i)]$ 。④产品市场出清,并且零利润条件决定均衡状态的临界质量水平。

当人口规模比较大时,有更多人来分摊固定成本,产生显著的规模经济效益,使得高品质产品的研发和生产成本得以稀释。因此,需要区分不同情况讨论:①当人口规模很大、厂商固定成本较小时,工业机器人应用使得收入差距缩小,增加的消费人口将释放对较高品质产品的有效需求,能够覆盖产品的固定成本,进而促进产品品质提升。②当人口规模较小、厂商固定成本很大时,尽管引入工业机器人会缩小劳动收入差距,但是,新增的消费人口释放的需求增加并不能覆盖产品的固定成本,高品质产品将没有企业提供,此时机器人应用不能促进产品品质提升。③在任何条件下,如果机器人应用导致劳动力工资收入差距增大,都会造成产品质量分布向更低水平集中。因此,本文提出如下假设:

H₃:工业机器人应用对产品品质升级的影响效果受到人口规模和厂商固定成本的调节。

三、研究设计

1. 数据与变量指标选择

(1)数据来源。本文使用的企业调查数据来源于2018年由武汉大学联合中国社会科学院、斯坦福大学、香港科技大学等多家权威机构共同完成的“中国企业—劳动力匹配调查”(简称CEES)。CEES是中国首个连接企业绩效和员工异质性的数据库,数据抽样采用权威的抽样框架,并使用分层随机抽样方法,确保所获得的样本能够高度代表中国的制造业。该调查收集了企业和员工的全面数据,企业问卷收集了企业生产情况、产品质量状况、人力资源情况等10个方面的数据,员工问卷收集了劳动力个体信息、受教育程度、收入等七个维度指标。在随年份变化的指标中,时间范围为2015—2017年。调查样本分布在广东、湖北、江苏、吉林、四川五个省份的101个县级行政区,涵盖东部、中部、西部和东北四大区域。

相比于国际机器人联合会(IFR)数据,本文使用的CEES数据具有独特优势。首先,CEES数据是专门针对中国企业进行的大规模、综合性实地调查,数据来源更加贴近中国实际情况,而IFR数据主要关注全球工业机器人的销售、应用及趋势,缺乏对特定国家或地区的深入分析和针对性。其次,IFR数据提供的是“国家—行业—年度”层面的数据,行业层面的指标实际上假设同一行业内所有企业都有同样的能力与意愿使用工业机器人,忽略了同行业内部的企业在应用机器人方面的异质性,因此,无法识别同一行业内不同企业使用机器人对产品品质的因果效应。

(2)被解释变量。本文的被解释变量是产品品质提升(*quality_up*),CEES的企业问卷包含企业产品质量状况。需要说明的是,问卷中关于产品品质提升原始编码,1代表是,2代表否,为了使得回归系数具有更直观的经济学含义,本文将该变量调整成0~1变量,0代表否,1代表是。在基准回归中,本文以企业问卷“G1.过去3年企业的最主要产品的质量是否明显提升”衡量产品品质提升,然后,参考Khandelwal需求信息反推法计算的产品品质水平,使用新产品比重替换解释变量检验基准回归结果的稳健性。

(3)核心解释变量。本文核心解释变量是企业的工业机器人应用密度(*lnrobot*),采用机器人密度加1取对数进行衡量。值得一提的是,机器人密度加1再取对数可以避免零值导致变量缺失问题。本文构造的机器人应用密度是一个连续型变量,不仅可以区分企业是否使用机器人,还可以

比较机器人应用程度的高低。

(4)控制变量。为控制其他因素对产品品质的影响,本文借鉴 DeStefano 和 Timmis(2024)^[2]、陈东和姚笛(2022)^[18]的研究,在基准回归中控制了企业规模、年龄、劳动生产率、资产负债比、企业类型、是否出口等与机器人应用相关并且影响企业产品品质的因素。另外,本文还通过固定效应控制了企业所在地区、行业等不随时间变化的影响因素。

2.模型设定

为了从更加微观的视角检验工业机器人应用对制造业产品品质的影响,本文基于 2015—2017 年企业层面机器人应用密度和微观产品质量数据构建如下基准回归模型。同时,为了尽量避免异方差或者序列相关问题对估计结果产生影响,所有回归均采用稳健标准误。

$$quality_up_{phit} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln robot_{phit} + X' + \delta_p + \mu_h + \lambda_t + \varepsilon_{phit} \tag{10}$$

其中, $quality_up_{phit}$ 表示 p 省份、 h 行业的 i 企业 t 年度最主要产品品质是否明显提升。 $\ln robot_{phit}$ 代表 p 省份、 h 行业的 i 企业 t 年度企业机器人应用密度对数, X' 代表控制变量向量,具体包括企业规模、企业年龄、劳动生产率、资产负债比、所有权性质、是否出口。 δ_p 、 μ_h 和 λ_t 分别表示省份固定效应、行业固定效应和年份固定效应, ε_{phit} 表示随机误差项。系数 α_1 的经济学含义是,工业机器人应用促进产品品质提升的概率。

3.变量描述统计和相关系数分析

表 1 是主要变量的定义和描述性统计。从工业机器人应用方面看,机器人应用密度均值为 0.272,最小值为 0,最大值为 2.708。进一步计算发现,工业机器人应用主要集中在装备制造业,机器人应用密度前三名的两位数行业分别是:汽车制造业,计算机、通信和其他电子设备制造业,电气机械和器材制造业。但是,烟草制品业,造纸和纸制品业,废弃资源综合利用业的工业机器人应用程度很低,反映出当前中国在智能化转型方面虽然进展迅速,但是行业异质性非常大,也并非所有企业都同步智能化。通过分样本进一步描述性统计发现,未使用工业机器人的企业和使用工业机器人的企业,产品质量提升的平均概率分别是 0.834 和 0.931。由此可见,相较于未使用工业机器人的企业,使用工业机器人企业产品质量提升的概率更大。然而,这些描述性结果仅揭示了变量间存在的相关关系,需要进一步实证分析以探究其内在因果机制。

表 1 变量定义和描述性统计

变量名称	变量符号	定义或计算方法	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
产品品质提升	<i>quality_up</i>	企业产品质量是否明显提升	5686	0.851	0.356	0	1
工业机器人应用密度	<i>lnrobot</i>	工业机器人密度加 1 后取对数	5459	0.272	0.730	0	2.708
企业规模	<i>lnfirmyscale</i>	资产总额取对数	5148	8.521	2.004	4.883	12.35
企业年龄	<i>lnage</i>	年份减去注册年份加 1 后取对数	5590	2.293	0.699	0.693	3.296
劳动生产率	<i>lnlp</i>	主营业务收入/总人数取对数	4788	3.520	1.082	1.362	5.427
资产负债比	<i>lnasset2debt</i>	总资产/总负债取对数	4685	0.830	0.747	-0.122	2.600
所有权性质	<i>firmtyp</i>	企业注册类型	5668	12.44	4.275	3	23
是否出口	<i>export</i>	企业是否出口	5607	1.636	0.481	1	2
行业赫芬达尔指数	<i>hhi</i>	行业内各企业市场份额平方和	3347	0.005	0.045	0	1
省份信息化水平	<i>informprov</i>	电信业务总量/地区生产总值	5642	0.029	0.009	0.015	0.045
省份研发强度	<i>lnRDprov</i>	规模以上工业企业 R&D 经费/地区生产总值	5642	4.890	0.428	4.229	5.367

表 2 列示了变量的相关性分析结果。结果显示,工业机器人应用密度(*lnrobot*)和产品品质提升(*quality_up*)之间有显著正向相关性,与本文预期假设一致。除企业规模(*lnfirmyscale*)和员工平均劳动生产率(*lnlp*)的相关系数为 0.533 之外,其他各个变量之间相关系数的绝对值均小于 0.5,且方差膨胀因子(VIF)最大值为 1.84,远小于 10。由此可以认为,变量之间不存在严重的多重共线性问题。

表 2 相关系数

变量	<i>quality_up</i>	<i>lnrobot</i>	<i>lnfirmyscale</i>	<i>lnage</i>	<i>lnlp</i>	<i>lnasset2debt</i>
<i>quality_up</i>	1					
<i>lnrobot</i>	0.084***	1				
<i>lnfirmyscale</i>	0.191***	0.357***	1			
<i>lnage</i>	0.031**	0.116***	0.370***	1		
<i>lnlp</i>	0.082***	0.160***	0.533***	0.146***	1	
<i>lnasset2debt</i>	0.021	-0.006	-0.011	-0.064***	-0.008	1
<i>firmttype</i>	0.040***	0.190***	0.127***	0.061***	0.047***	0.059***
<i>export</i>	-0.123***	-0.162***	-0.269***	-0.209***	-0.056***	0.047***
<i>hhi</i>	0.032*	0.026	0.096***	0.040**	0.078***	-0.014
<i>informprov</i>	-0.058***	0.032**	-0.029**	0.035***	-0.062***	0.050***
<i>lnRDprov</i>	0.009	0.106***	0.027*	0.093***	-0.033**	-0.023
变量	<i>lnasset2debt</i>	<i>firmttype</i>	<i>export</i>	<i>hhi</i>	<i>informprov</i>	<i>lnRDprov</i>
<i>lnasset2debt</i>	1					
<i>firmttype</i>	0.059***	1				
<i>export</i>	0.047***	-0.236***	1			
<i>hhi</i>	-0.014	0.020	-0.012	1		
<i>informprov</i>	0.050***	0.017	-0.006	-0.037**	1	
<i>lnRDprov</i>	-0.023	0.234***	-0.411***	0.007	-0.217***	1

注：*、**和***分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著。下同

四、实证检验与结果分析

1. 基准回归分析

工业机器人应用对制造业企业产品品质提升的基准回归结果如表 3 所示。其中,第(1)列是没有添加任何控制变量的估计结果,第(2)~(3)列分别是逐步加入控制变量和固定效应的估计结果,第(4)~(5)列分别是采用 Probit 回归和 Logit 回归的结果。从回归结果看,平均而言,工业机器人应用对产品品质提升的影响在 1% 的水平上显著。本文选择第(3)列的估计作为基准结果,机器人应用密度的估计系数是 0.017,意味着企业机器人应用密度增加一倍,产品品质提升的概率大约提高 1.7%。综合上述估计结果,工业机器人应用促进了制造业产品品质提升,基准回归结果验证假设 H₁。

本文的研究揭示了工业机器人应用在制造业企业产品品质提升中的积极作用,这一发现与 DeStefano 和 Timmis(2024)^[2]的研究结论相一致,然而,在影响机制方面存在明显区别。本文认为,工业机器人对制造业产品品质的影响并不仅局限于生产技术的改进,收入差距及其所引发的产品品质需求变化同样具有重要影响。工业机器人的广泛应用不仅直接促进了产品品质的提升,而且从宏观层面来看,产品品质的整体改善也得益于需求侧的拉动效应,而不是单纯依赖于供给侧生产技术的革新。

表 3 工业机器人应用影响制造业品质提升的基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	<i>quality_up</i>	<i>quality_up</i>	<i>quality_up</i>	<i>quality_up</i>	<i>quality_up</i>
<i>lnrobot</i>	0.041*** (8.243)	0.020*** (3.755)	0.017*** (2.679)	0.177*** (2.682)	0.365*** (2.387)
<i>lnfirm scale</i>		0.030*** (6.096)	0.028*** (5.496)	0.138*** (4.892)	0.266*** (4.729)
<i>lnage</i>		-0.039*** (-3.493)	-0.043*** (-3.818)	-0.260*** (-3.989)	-0.463*** (-3.709)
<i>lnlp</i>		-0.023*** (-3.093)	-0.027*** (-3.237)	-0.155*** (-3.441)	-0.291*** (-3.234)
<i>lnasset2debt</i>		0.001 (0.078)	-0.001 (-0.123)	0.001 (0.030)	0.015 (0.159)
<i>firmtype</i>		0.001 (0.634)	-0.000 (-0.018)	-0.001 (-0.069)	-0.004 (-0.252)
<i>export</i>		-0.073*** (-5.242)	-0.073*** (-4.712)	-0.418*** (-4.705)	-0.803*** (-4.546)
<i>hhi</i>		0.120*** (5.307)	0.668*** (5.578)	19.461*** (2.908)	34.230*** (2.705)
<i>informprov</i>		-1.586** (-2.221)	0.867 (0.242)	-17.288*** (-2.736)	-32.626*** (-2.654)
<i>lnRDprov</i>		-0.034* (-1.956)	0.012 (0.055)	-0.187* (-1.937)	-0.349* (-1.949)
常数项	0.836*** (156.548)	1.100*** (10.021)	0.809 (0.789)	3.171*** (4.603)	5.737*** (4.439)
观测值	5447	2529	2381	2310	2310
R ²	0.007	0.052	0.097		
行业/省份/年份 固定效应	否	否	是	是	是

注:括号内为*t*值

2. 内生性处理及稳健性检验

尽管本文使用了微观层面数据研究工业机器人应用对制造业产品品质的影响,但是,基准结果仍然受到内生性问题干扰。首先,机器人技术采用并非随机发生,而是有预期回报的投资。因此,工业机器人应用和产品品质之间可能存在反向因果关系,即企业为了提升产品品质,所以采用更多的机器人,而不是机器人应用导致产品品质提升。并且,使用工业机器人的企业往往也是生产较高品质产品的那部分企业,这部分企业作为技术领先者,智能化转型的需求更加迫切。其次,考虑到现实中影响企业产品品质的宏观和微观因素非常复杂,即便本文已控制系列可观测变量,并且通过固定效应吸收所有非时变异质性,但仍难以完全排除潜在遗漏变量的可能性,这些被遗漏的变量同时影响工业机器人应用和产品品质提升,例如 ICT 信息通信技术,这种技术进步与工业机器人技术同时发生,并且两者难以完全分离。

本文采用两阶段最小二乘法(2SLS)处理反向因果问题,在工具变量构建上进行了方法创新。借鉴 Acemoglu 和 Restrepo(2020)^[15]、田高良等(2023)^[36]的思路,构建了一个新型 Bartik 工具变量:选取美国及欧洲五国(丹麦、芬兰、法国、意大利、瑞典)技术前沿地区,以其工业机器人应用密度作为中国工业机器人应用的外生预测因素,以此消除工业机器人引入可能由产品品质较高的企业先

行采用所导致的内生性问题。机器人存量数据来自 IFR 数据,基期就业人数来自世界银行等国际组织。

美国和欧洲作为全球技术创新的重要的地区,较早就开始应用机器人并保持领先,中国、美国以及欧洲五国在工业机器人、技术革新等智能制造相关领域的发展过程中存在较多可比性和竞争性(田高良等,2023^[36];王永钦和董雯,2020^[37]),并且这些国家的工业机器人应用不会直接影响到中国制造业的产品品质。因此,使用美国和欧洲五国工业机器人数据构造的工具变量能够反映工业机器人的发展趋势,且与原残差项不存在相关性,满足工具变量的相关性和排他性要求。

$$robot_{it}^{iv} = \sum_s \frac{employ_{sit0}}{employ_{it0}} \frac{robot_{it}^{useu5}}{employ_{it2000}^{useu5}}$$
(11)

为了确保工具变量满足外生性条件,本文同时也采用 Lewbel(2012)^[38]提出的异方差工具变量法(heteroskedasticity-based identification)作为补充检验,并且这种方法已被其他研究(孙早和侯玉琳,2021)^[39]证实能有效提升估计的稳健性。根据 Lewbel(2012)^[38]的证明,如果内生变量对模型中其他外生变量回归后的残差是异方差的,那么利用该残差与去中心化后的外生变量相乘,可以构造出有效的工具变量。异方差工具变量法在弱工具变量情况下依然能够得到一致的估计量,是处理内生性问题的一种新思路和方法。

表 4
 工具变量回归结果

变量	美国和欧洲五国 Bartik 工具变量		Lewbel 异方差工具变量		两个工具变量	
	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段
	lnrobot (1)	quality_up (2)	lnrobot (3)	quality_up (4)	lnrobot (5)	quality_up (6)
lnrobots_iv	0.513*** (0.173)				0.040 (0.025)	
iv_lewbel			0.093*** (0.0003)		0.093*** (0.0003)	
lnrobot		-0.227 (0.163)		0.017* (0.009)		0.017* (0.009)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
常数项	-1.563 (2.389)	0.432 (1.179)	-2.028*** (0.348)	0.808 (0.996)	-2.029*** (0.348)	0.808 (0.996)
一阶段 F 值	18.34		3376.95		3302.40	
观测值	2381	2381	2381	2381	2381	2381
R ²	0.2523		0.9842	0.097	0.9842	0.097
行业/省份/年份 固定效应	是	是	是	是	是	是

注:括号内为估计系数的标准误

工具变量回归结果如表 4 所示,第(1)~(2)列是采用美国和欧洲五国数据构建 Bartik 工具变量的回归结果,第(3)~(4)列是采用 Lewbel 异方差工具变量的回归结果,第(5)~(6)列是同时加入两个工具变量的回归结果。可以发现,工具变量第一阶段回归结果系数分别是 0.513 和 0.093,并且都在 1% 水平显著,但是 Bartik 工具变量第二阶段回归结果在 16% 的水平接近显著,异方差工具变量第二阶段估计结果在 10% 水平显著,表明工业机器人应用确实显著促进了制造业产品品质提升。此外,针对遗漏变量问题,本文还进一步做了其他检验。本文加入了行业×年份高维固定效应,吸收因年份而异的行业固定效应,这部分联合固定效应会吸收很大一部分数据变化。估计结果表明,在加入行业虚拟变量和年份虚拟变量交互项之后,核心解释变量的系数依然显著,基准结论依

然稳健。

其次,根据 Khandelwal 提出的需求信息反推法计算产品品质。具体测算过程为:第一步,在 D-S 需求效用函数中引入产品质量维度。根据消费者效用最大化原则,可以得到需求函数的表达式: $q(\omega) = \lambda(\omega)^{\sigma-1} p(\omega)^{-\sigma} P^{\sigma-1} Y$ 。第二步,对消费需求函数两边取对数,可以得到企业产品品质估计方程,回归的残差 ε_{imh} 包含产品品质信息。第三步,在考虑内生性的基础上,对产品品质估计方程在产品层面进行回归并提取残差,最终得到产品品质的表达式。为了便于整体比较,需要对产品品质测算结果进行标准化处理,从而得到标准化品质指标。此外,本文使用新产品收入占产品销售收入比重作为产品品质的替代指标,理由在于,新产品通常是对原产品的改进,“更新换代”之后的产品品质会高于原产品。

表 5 替换解释变量的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	quality1	quality1	quality1	quality2	quality2	quality2
<i>lnrobot</i>	0.043*** (30.610)	0.004*** (5.003)	0.003*** (2.679)	0.043*** (8.391)	0.012* (1.691)	0.008 (0.678)
控制变量	不控制	控制	控制	不控制	控制	控制
常数项	0.360*** (277.331)	-0.032*** (-3.006)	-0.031* (-1.715)	0.252*** (58.510)	0.030 (0.307)	0.362 (1.121)
观测值	4632	2384	2384	5459	2532	2384
R ²	0.127	0.869	0.880	0.011	0.056	0.161
行业/省份/年份 固定效应	否	否	是	否	否	是

注:括号内为 *t* 值,下同

替换被解释变量的回归结果如表 5 所示,第(1)~(3)列结果表明,核心解释变量的系数分别为 0.043、0.004 和 0.003,并且都在 1% 显著水平上显著,第(4)列~(5)列核心解释变量的系数分别是 0.043 和 0.012,并且分别在 1% 和 10% 显著水平显著,第(6)列核心解释变量的系数是 0.008,结果虽然不显著,但系数仍然为正。上述结果进一步证明,工业机器人应用促进产品品质提升的基准结论具有稳健性。

3. 行业和机器人类型异质性分析

通过上述实证检验发现,工业机器人应用可以显著促进制造业产品品质提升。在此基础上,本文进一步分别对不同制造业样本和不同类型工业机器人进行分组回归。制造业可以分为先进制造业和传统制造业,工业机器人可以分为加工制造类机器人、包装与检测类机器人,其中,加工制造类机器人包括焊接机器人、刷漆机器人、组装机机器人、表面贴装机器人,包装与检测类机器人包括包装机器人、码垛机器人、产品检测和测试机器人。通过分样本回归可以区分工业机器人应用促进产品品质提升的行业异质性,识别不同类型工业机器人对产品品质升级的差异化影响,同时,还可以通过观察不同分组情形核心解释变量的估计结果是否存在显著差异来检验基准结果的稳健性。

异质性分样本回归估计结果如表 6 所示。从行业异质性来看,先进制造业的估计系数显著为正,系数为 0.033,与基准回归的系数符号一致,传统制造业的估计系数为正,系数为 0.019,但并不显著。具体而言,使用工业机器人可以显著促进先进制造业产品品质提升,但是,对传统制造业的产品品质提升效应并不显著。从机器人异质性来看,加工制造类机器人和包装检测类机器人的估计系数分别为 0.033 和 0.036,并且都在 1% 水平显著,因此,加工制造类机器人和包装检测类机器人对产品品质都存在显著的正向提升效果。上述结果表明,加快中国制造智能化转型势在必行,

先进制造业应强化技术创新和智能化改造,传统制造业则需突破技术瓶颈,并且在推进制造业智能化升级时,应更加注重机器人的适用性,优先在加工、精密装配等共性需求领域部署机器人。

表 6
 异质性分样本回归结果

变量	产品品质				产品品质(Khandelwal 法)	
	先进制造业		传统制造业		加工制造类机器人	包装检测类机器人
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
lnrobot	0.049*** (8.144)	0.033*** (4.085)	0.030*** (2.768)	0.019 (1.325)	0.033*** (8.687)	0.036*** (5.265)
控制变量	不控制	控制	不控制	控制	不控制	不控制
常数项	0.860*** (87.362)	0.672 (0.406)	0.807*** (108.696)	0.731 (0.449)	0.380*** (47.041)	0.391*** (28.997)
观测值	1528	753	3047	1205	421	150
R ²	0.017	0.076	0.002	0.114	0.162	0.175
行业/省份/年份 固定效应	否	是	否	是	否	否

五、进一步讨论

1. 机制检验

为了检验工业机器人应用从需求侧影响制造业产品品质升级的机制,即验证研究假设 H₁和假设 H₂,结合江艇(2022)^[40]关于中介效应分析的操作建议,如果机制变量对被解释变量的影响是直接显然的,那么机制检验的关键就是识别核心解释变量对机制变量的因果关系。理论上,随着工资差距的缩小,将有更多消费者能够负担得起高品质产品,从而扩大高品质产品的市场需求。因此,本文机制检验部分将重点围绕核心解释变量对机制变量的因果关系展开,即检验工业机器人应用与工资收入差距变化的因果关系。机制检验计量模型设定如下:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 robot_i \times female_{ij} + \beta_2 female_{ij} + \varphi Z' + firm_j + \varepsilon_{ij} \tag{12}$$

本文使用小时工资对数作为被解释变量。从调查数据来看,男性劳动力平均每月工作时长比女性劳动力多七个小时,小时工资指标相对于月度工资指标的优势在于,可以排除加班等延长工作时间对个体工资收入的影响。本文分别控制了行业固定效应和企业固定效应,从而把工资收入差异的比较限制在相同行业或者企业内部的男性员工和女性员工之间。值得说明的是,β₁表示工业机器人应用前后女性工资收入的变化,β₂表示在未使用工业机器人的企业中女性和男性的工资差距。当β₁显著为正并且β₂显著为负时,表明工业机器人应用显著缩小性别工资收入差距。

机制检验回归结果如表 7 所示,第(1)~(4)列分别是逐步加入控制变量、行业固定效应或企业固定效应的回归结果,其中第(1)~(3)的交互项系数估计结果分别是 0.209、0.206 和 0.125,并且分别在 1%、1% 和 10% 水平显著,第(4)列的交互项系数估计结果是-0.012,但不显著。根据第(3)列同时加入控制变量和行业固定效应的回归结果,可以发现,在没有使用工业机器人之前,女性劳动力比男性劳动力工资相差 13.4%。在应用工业机器人之后,女性劳动力的工资相比使用工业机器人之前提高 12.5%。同时,第(5)列~(6)列是加入技能交互项的回归结果,在控制企业固定效应的情形下,技能交互项和一次项的估计系数分别是 0.215 和 0.039,但并不是同时显著。因此,工业机器人应用主要通过缩小性别工资收入差距影响产品品质,而不是技能工资收入差距。检验结果与假设 H₂预期一致。

表 7 工业机器人应用对工资收入差距的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>lnwage</i>	<i>lnwage</i>	<i>lnwage</i>	<i>lnwage</i>	<i>lnwage</i>	<i>lnwage</i>
<i>robot×female</i>	0.209*** (19.674)	0.206*** (7.858)	0.125** (2.575)	-0.012 (-0.227)		
<i>female</i>	-0.236*** (-36.900)	-0.158*** (-11.911)	-0.134*** (-6.109)	-0.119*** (-4.279)		
<i>robot×skill</i>					0.235*** (13.722)	0.215** (2.445)
<i>skill</i>					0.106*** (4.499)	0.039 (0.898)
控制变量	不控制	控制	控制	控制	控制	控制
常数项	3.013*** (708.852)	0.911*** (5.681)	0.762*** (2.738)	1.552*** (5.011)	0.853*** (5.294)	1.631*** (5.493)
观测值	33842	9317	8591	9271	9090	9047
R ²	0.039	0.144	0.173	0.634	0.149	0.636
行业固定效应	否	否	是			
企业固定效应				是	否	是

考虑到工业机器人应用对性别工资收入差距的潜在影响可能在不同收入分位数上存在差异,本文进一步采用Firpo等(2018)^[41]提出的再中心化影响函数(RIF)控制相关混淆因素的影响,估计工业机器人对性别工资收入差距的无条件分位数偏效应。与传统的OLS回归相比,RIF回归的估计结果更加稳健,能更有效地缓解因遗漏变量等问题导致的内生性偏差,并且,RIF回归能够反映工业机器人应用对工资收入差距的边际影响,这是其他方法所难以比拟的(Firpo等,2009)^[42]。为了估计工业机器人应用对不同收入分位数上性别收入差距的影响,本文构建如下RIF回归模型:

$$E[RIF(Y_{ij}; q_{\tau})|Z_{ij}] = Z_{ij}\beta + \varepsilon \quad (13)$$

其中, $RIF(Y_{ij}; q_{\tau})$ 是再中心化影响函数, Y 代表因变量收入的对数值, q_{τ} 是收入的第 τ 分位数。 Z_{ij} 包括交互项 $robot_i \times female_{ij}$ 、员工层面的控制变量和企业固定效应。

使用RIF方法对不同分位数收入的回归结果如表8所示。在第(1)~(5)列中,本文使用小时工资的对数作为因变量,考察了工业机器人应用与性别工资收入差距在不同收益分位数上的关系。回归结果表明,在10分位和25分位收入水平,工业机器人和性别交互项的估计系数分别为0.209和0.086,性别一次项的估计系数分别为-0.167和0.144,并且都是显著的,但是在更高分位收入水平,交互项和一次项不再显著,由此可见,工业机器人应用在缓解较低收入群体工资收入差距方面的效果尤为显著。

表 8 再中心化影响函数(RIF)回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$q(10)$	$q(25)$	$q(50)$	$q(75)$	$q(90)$
<i>robot×female</i>	0.209*** (3.530)	0.086* (1.771)	-0.015 (-0.272)	-0.087 (-1.018)	-0.445*** (-3.455)
<i>female</i>	-0.167*** (-4.217)	-0.144*** (-4.973)	-0.084*** (-2.971)	-0.098*** (-2.929)	-0.095** (-2.039)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
常数项	1.289*** (3.024)	1.493*** (4.899)	1.949*** (6.278)	1.446*** (3.647)	1.081* (1.813)
观测值	9271	9271	9271	9271	9271
R ²	0.496	0.559	0.601	0.605	0.526
企业固定效应	是	是	是	是	是

2. 人口规模及厂商固定成本的调节作用

在产品市场,假设市场中只有一种产品但产品品质存在差异,企业进行垄断生产和定价。消费者根据自身收入、产品品质和产品价格选择某个质量水平的产品消费,遵循效用最大化原则,并且在预算约束范围内,消费者优先选择品质更高的产品。理论分析表明,工业机器人应用可以提高脑力劳动者工资水平,并且有助于缩小性别工资差距,工资收入变化对产品品质升级的影响跟消费者人口规模和厂商固定成本有关。

参考已有研究,本文设定消费者收入分布服从对数正态分布,其累积分布函数为 $F(y) = \Phi[(\ln y - \mu)/\sigma]$,其中 μ 和 σ 为参数, σ 与基尼系数存在一一对应关系。在给定的参数值下,如收入均值 $E(y)$ 、基尼系数初始值、人口规模 N ,通过数值方法计算初始的产品品质,从假设的最高质量开始,逐步降低产品质量水平,直到找到使得厂商利润为零的质量点。保持其他参数不变,比如收入均值 $E(y)$ 、人口规模 N 不变,逐步增加基尼系数的值,在重复上述步骤时,特别关注人口规模 N 的值。设定一个人口规模不断增大的场景,并重复上述步骤。分别比较在不同人口规模很大和不同固定成本的情况下,基尼系数变化对高品质产品消费者比重影响的差异。图 1(a)描绘了人口规模与高品质产品消费者比重的关系,图 1(b)描绘了厂商固定成本与高品质产品消费者比重的关系。当基尼系数给定时,人口规模越大,高品质消费者占比会提高。当给定厂商固定成本或者人口规模时,基尼系数减小,高品质消费者占比也会提高。

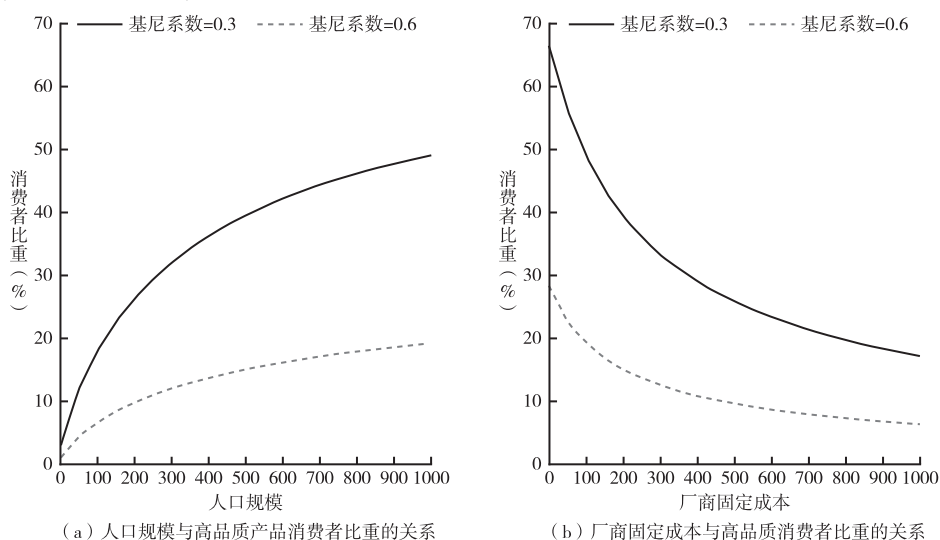


图 1 人口规模、固定成本与高品质产品消费者比重

如图 2 所示,在人口规模很大并且厂商固定成本较小的情况下,工业机器人技术能使得人口收入分配差距减少,即基尼系数变小,为高品质产品提供了更多的市场需求,这会有利于提升产品品质。相比之下,在人口规模较小并且厂商固定成本较大的情况下,基尼系数与产品品质正向变化,基尼系数减小对产品品质升级产生负向影响。因此,结果表明,工业机器人应用经由需求侧对产品品质提升的正向作用受到人口规模和厂商固定成本的调节,验证了假设 H_3 。

本文的研究发现具有重要的现实意义。中国拥有超过 14 亿的人口,人口规模基数以及市场需求潜力都很大,这是中国制造业产品品质升级的重大优势。应当借助这一轮工业机器人技术变革的机遇改善收入分配结构,缩小工资收入差距,扩大共同富裕群体,将我国人口规模巨大的国情转换为现实优势,充分发挥需求侧的作用,形成需求驱动型产品品质升级的内生动力。

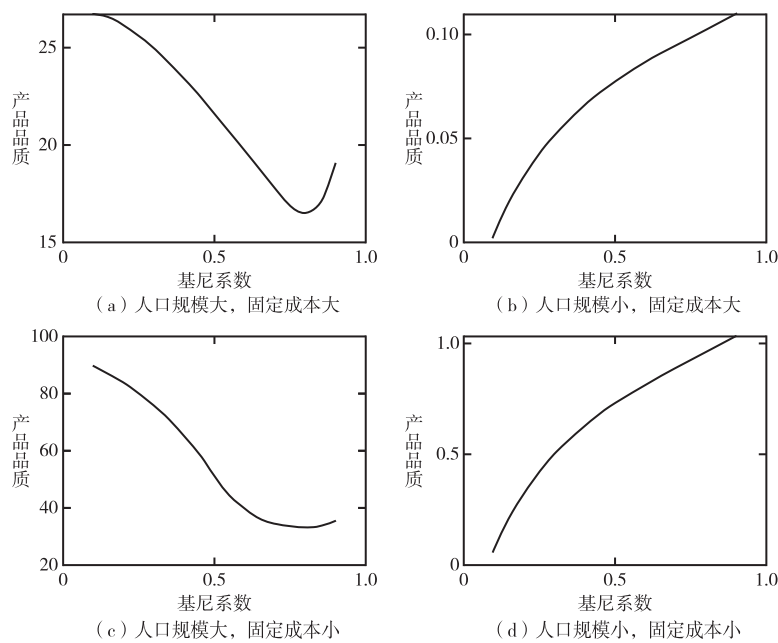


图2 人口规模及厂商固定成本对需求拉动型产品品质升级的调节作用

六、主要结论与政策启示

1. 研究结论

工业机器人技术的快速发展和应用为中国制造业产品品质升级带来重要机遇。本文在 Welch “脑力—体力”模型基础上,将机器人资本引入生产函数,研究工业机器人应用对制造业产品品质升级的影响。理论分析表明,机器人资本扩张会提高脑力劳动的相对需求,导致脑力劳动者的工资上涨。尽管男性比女性更具备体力优势,但在脑力认知方面,男性和女性并没有显著差异,因此,随着工业机器人应用的增加,女性将从脑力认知技能价格上涨中获得更多的工资收入溢价,从而缩小性别工资差距。工业机器人应用引起的工资收入差距变化,会通过需求传导机制对产品市场产生影响,并且工业机器人应用对产品品质影响的作用方向跟人口规模和厂商固定成本有关。

进一步,本文利用中国企业—劳动力匹配调查数据,实证检验了工业机器人应用通过缩小工资收入差距对我国制造业产品品质的影响。实证结果表明:第一,工业机器人应用显著促进了制造业产品品质升级。在考虑内生性问题并且基于多种产品品质测算方法的检验,均发现基准结论具有稳健性。第二,机制检验表明,制造业产品品质升级确实得益于需求侧的拉动效应,工业机器人应用对女性劳动力工资的正向影响大于对男性劳动力工资的影响,通过缩小性别工资收入差距而不是技能工资收入差距,形成需求驱动型产品品质升级的拉力。第三,工业机器人应用经由需求侧对产品品质升级的影响效果受到人口规模和厂商固定成本的调节。当人口规模较大、厂商固定成本较小时,工业机器人应用对产品品质的提升效果最明显;当人口规模较小、厂商固定成本较大时,工业机器人应用不能提升产品品质;在任何条件下,收入差距基尼系数的扩大都会降低产品品质。

2. 政策建议

本研究可以为我国借助智能化技术变革缩小收入分配差距,提升国内本土市场对高质量产品的需求,更好地发挥需求侧的关键作用,促进我国制造业产品品质升级提供新思路。为此,本文提出如下政策建议:

第一,注重发挥需求侧的关键作用,与供给侧协同拉动中国制造品质升级。本研究发现,工业

机器人应用能够缩小工资收入差距,我国作为拥有超过 14 亿人口的发展中国家,同时也是全球中等收入群体规模最大的国家,收入差距缩小将推动需求结构升级,释放对高品质产品的需求潜力,这是中国制造业产品品质升级的重大优势。为了将这一潜在优势转化为驱动中国制造品质升级的现实动力,政府在全面稳步推进制造业产品品质升级的过程中,应注重需求侧拉力与供给侧推力两方面力量协同。一方面,通过供给侧结构性改革,不断优化产业结构;另一方面,着力扩大有效需求,特别是高品质产品的需求,激发市场活力,引导企业创新升级,形成需求牵引供给、供给创造需求的良性循环。

第二,积极顺应技术变革,构建“橄榄型”收入分布结构。当前快速发展的人工智能技术变革为制造业品质升级提供了前所未有的机遇,但这一机遇的把握需要政府和企业的共同努力。企业应调整战略积极适应人工智能技术发展趋势,主动加快智能化转型升级。政府在加大对智能制造领域支持的同时,必须高度关注工资收入差距的变化,配套实施收入分配改革政策,缩小工资收入差距,构建“橄榄型”的人口—收入结构,提高中等收入群体比重,扩大具有高品质产品消费能力的人口规模,提升市场整体消费能力,同时,为智能制造技术的广泛应用创造更为广阔的市场空间。

第三,在推动企业智能化改造的过程中,应兼顾质量升级与收入分配目标。本文实证结果表明,体力替代型的智能化改造有利于缩小性别工资差距,并有利于产品质量升级。因此,在推进智能化改造的进程中,应对其产生的技能偏向进行合理评估,重点支持能够同时兼顾技术升级与收入公平的领域,使产业升级与收入分配改革同步推进,坚持走兼顾效率与公平的新型工业化道路。

3. 研究局限与展望

本文还存在一些不足之处:一是研究数据时效性问题。限于数据的可获得性,本研究采用的主要微观数据来自 2018 年中国企业—劳动力匹配调查,尽管这是当前可获得的最新数据,但考虑到近些年工业机器人技术发展迅猛,这些数据存在一定的时效限制。二是没有考虑高端消费市场对中国品牌信任度不足的问题。例如,尽管在某些制造领域,国产品牌质量已经显著提升,但中高收入消费者仍倾向于支付更高的价格购买国外的同类产品。因此,未来可以拓展的方向有:开展最新微观数据调查,纳入最新工业机器人应用数据;把消费者信任纳入分析框架,使理论模型与现实更加接近。

参考文献

- [1]易苗,刘朋春,郭白滢.机器人应用、企业规模分化与劳动收入份额[J].北京:世界经济,2024,(6):176-200.
- [2]DeStefano, T., and J.Timmis.Robots and Export Quality[J].Journal of Development Economics, 2024, 168, 103248.
- [3]史丹,李鹏.中国工业 70 年发展质量演进及其现状评价[J].北京:中国工业经济,2019,(9):5-23.
- [4]扩大内需战略研究课题组,史丹,张其仔,周维富,李先军,吴海军.论高质量供给引领和创造新需求[J].北京:经济动态,2023,(11):3-19.
- [5]Welch, F.Growth in Women's Relative Wages and in Inequality among Men: One Phenomenon or Two?[J].American Economic Review, 2000, 90, (2): 444-449.
- [6]王林辉,胡晨明,董直庆.人工智能技术会诱致劳动收入不平等吗——模型推演与分类评估[J].北京:中国工业经济, 2020,(4):97-115.
- [7]Acemoglu, D., and P.Restrepo.The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment[J].American Economic Review, 2018, 108, (6): 1488-1542.
- [8]王斌,王志华,谭清美.工业机器人应用能否反哺企业基础科学研究?[J].北京:经济管理,2024,(11):5-24.
- [9]陈彦斌,林晨,陈小亮.人工智能、老龄化与经济增长[J].北京:经济研究,2019,(7):47-63.
- [10]杨光,侯钰.工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J].北京:中国工业经济,2020,(10):138-156.
- [11]王启超,孙广生.智能化的“去错配”效应与全要素生产率增长[J].北京:管理评论,2024,(4):39-48.

- [12]程文.人工智能、索洛悖论与高质量发展:通用目的技术扩散的视角[J].北京:经济研究,2021,(10):22-38.
- [13]Aghion, P., B.F.Jones, and C.I.Jones.Artificial Intelligence and Economic Growth[A].The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda[M].University of Chicago Press,2018.
- [14]王筱筱,卢国军,崔小勇.自动化是否扩大了企业内部收入差距——来自制造业非国有上市公司的证据[J].北京:经济科学,2023,(4):85-103.
- [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]许健,季康先,刘晓亭,夏炎.工业机器人应用、性别工资差距与共同富裕[J].北京:数量经济技术经济研究,2022,(9):134-156.
- [17]Deng, Y., A. Feng, and D. Hu.Gender Earnings Gap in Chinese Firms: Can It be Narrowed by Industrial Robots?[J].China Economic Review, 2025, 89, 102328.
- [18]陈东,姚笛.人工智能扩大了企业间的工资差距吗?——来自中国工业企业的证据[J].北京:经济科学,2022,(3):127-142.
- [19]Autor, D. H.Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation[J].Journal of Economic Perspectives, 2015, 29, (3):3-30.
- [20]余铃铮,魏下海,孙中伟,吴春秀.工业机器人、工作任务与非常规能力溢价——来自制造业“企业—工人”匹配调查的证据[J].北京:管理世界,2021,(1):47-59.
- [21]孙健,朱立怡,凌子曦,许锐.智能制造是否促进了企业股利分配——来自进口工业机器人的证据[J].北京:经济管理, 2025,(2):65-83.
- [22]杨飞,范从来.产业智能化是否有利于中国益贫式发展?[J].北京:经济研究,2020,(5):150-165.
- [23]Tilley, J.Automation, Robotics, and the Factory of the Future[J].McKinsey & Company, 2017, 67, (1):67-72.
- [24]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].北京:世界经济,2022,(9):3-31.
- [25]黄先海,王瀚迪,孙涌铭,虞柳明.数字技术与企业出口质量升级——来自专利文本机器学习的证据[J].北京:数量经济技术经济研究,2023,(12):69-89.
- [26]侯俊军,张莉,窦钱斌.“机器换人”对劳动者工作质量的影响——基于广东省制造企业与员工的匹配调查[J].北京:中国人口科学,2020,(4):113-125.
- [27]Frey, C. B., and M. A.Osborne.The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation?[J].Technological Forecasting and Social Change, 2017, 114:254-280.
- [28]Yurko, A. V.How Does Income Inequality Affect Market Outcomes in Vertically Differentiated Markets?[J].International Journal of Industrial Organization, 2011, 29, (4):493-503.
- [29]李世刚,李晓萍,江飞涛.收入分配与产品质量前沿[J].北京:中国工业经济,2018,(1):24-40.
- [30]戴翔,李亚,占丽.消费需求升级与企业出口国内增加值提升[J].长沙:消费经济,2022,(1):44-56.
- [31]蒋灵多,陈虹曦,陆毅,张国峰.消费结构升级与出口产品质量提升[J].北京:数量经济技术经济研究,2024,(5):5-26.
- [32]施炳展,曾祥菲.中国企业进口产品质量测算与事实[J].北京:世界经济,2015,(3):57-77.
- [33]Khandelwal, A.The Long and Short (of) Quality Ladders[J].Review of Economic Studies, 2010, 77, (4):1450-1476.
- [34]Khandelwal, A. K., P.K.Schott, and S.-J.Wei.Trade Liberalization and Embedded Institutional Reform: Evidence from Chinese Exporters[J].American Economic Review, 2013, 103, (6):2169-2195.
- [35]李坤望,蒋为,宋立刚.中国出口产品品质变动之谜:基于市场进入的微观解释[J].北京:中国社会科学,2014,(3):80-103.
- [36]田高良,施诺,刘晓丰.智能制造与劳动力成本粘性——基于工业机器人应用的视角[J].北京:经济管理,2023,(9):28-49.
- [37]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].北京:经济研究,2020, (10):159-175.
- [38]Lewbel, A.Using Heteroscedasticity to Identify and Estimate Mismeasured and Endogenous Regressor Models[J].Journal of Business & Economic Statistics, 2012, 30, (1):67-80.
- [39]孙早,侯玉琳.工业智能化与产业梯度转移:对“雁阵理论”的再检验[J].北京:世界经济,2021,(7):29-54.
- [40]江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].北京:中国工业经济,2022,(5):100-120.
- [41]Firpo, S. P., N. M. Fortin, and T. Lemieux.Decomposing Wage Distributions Using Recentered Influence Function Regressions [J].Econometrics, 2018, 6, (2):28.
- [42]Firpo, S., N.M.Fortin, and T.Lemieux.Unconditional Quantile Regressions[J].Econometrica, 2009, 77, (3):953-973.

Robotic Applications,Wage Income Gap and Manufacturing Product Quality Upgrading

WANG Qi-chao¹, LUO Lian-fa²

(1.School of Economics, Capital University of Economics and Business, Beijing, 100070, China;

2.Institute of Quality Development Strategy, Wuhan University, Wuhan, Hubei, 430072, China)

Abstract: As a pivotal industry underpinning China's economy, the manufacturing sector plays a critical role in driving economic growth. Nevertheless, the quality of Chinese manufactured products remains suboptimal, characterized by an oversupply of low-end goods and a deficit of high-quality alternatives, reflecting a pronounced gap compared to global benchmarks. The rapid advancement of industrial robotics technology now presents an unprecedented opportunity for upgrading China's manufacturing quality. Notably, within the wave of intelligent transformation centered on industrial robots, China has achieved frontier status in select domains. In this context, this paper systematically investigates the impact of industrial robot applications on manufacturing product quality and the underlying mechanisms. The findings not only provide empirical evidence to support enterprises in proactively adapting to intelligent transformation, but also offer novel insights for advancing quality upgrading in Chinese manufacturing. This research contributes substantively to facilitating the transition of China's manufacturing sector toward a higher-quality development stage.

This paper develops a theoretical model to analyze the economic logic through which industrial robot applications reduce wage inequality, achieve common prosperity among firms within industries, and consequently drive product quality improvement from the demand side. Building upon Welch's (2000) "brain-and-brawn model", we incorporate robot capital into the production function and distinguish labor skills between brain-intensive cognitive skills and muscle-intensive non-cognitive skills. The findings reveal that under conditions where robot capital more readily substitutes for physical labor while traditional capital more easily replaces mental labor, the expansion of robot capital increases the relative demand for cognitive labor, leading to rising wages for brain-intensive skills. Given the inherent endowment differences between genders, males possess comparative advantages in physical strength relative to females, while demonstrating no statistically significant disparity in cognitive abilities. Consequently, the accumulation of robotic capital disproportionately benefits female workers through wage premiums associated with brain-intensive cognitive skills, thereby compressing gender wage differentials. Our extended analysis reveals that the directional impact of industrial robot applications on product quality is contingent upon two critical market parameters: consumer population size and firms' fixed production costs. In large consumer markets, the income redistribution effect stemming from robot-induced wage compression significantly enhances effective demand for quality-differentiated manufactured goods. This demand expansion, coupled with the scale economies achieved through robotic automation, enables firms to amortize the substantial fixed costs associated with intelligent production systems. Consequently, this dual mechanism facilitates Keynesian demand-pull quality upgrading.

Based on the 2018 China Employer-Employee Survey (CEES) database, this paper empirically examines the impact of industrial robot application on the product quality of China's manufacturing industry by narrowing the wage income gap. The empirical results demonstrate that industrial robot adoption has significantly promoted quality upgrading in manufacturing sectors. On average, a doubling of robot penetration rate increases the probability of product quality improvement by approximately 1.7 percentage points. The baseline findings demonstrate robust statistical significance after considering a series of endogeneity problems. Mechanism analysis reveals that manufacturing quality upgrading primarily stems from demand-side effects, where industrial robot adoption exhibits asymmetric wage impacts. This gender-differentiated effect reduces inter-firm wage inequality predominantly through narrowing gender pay gaps rather than skill-based wage differentials, thereby creating a "common prosperity" effect across enterprises within the industry.

Research contributions are reflected in the following aspects: Firstly, this paper extends beyond conventional labor market analyses by pioneering a theoretical framework connecting industrial robot adoption with product quality enhancement. Secondly, this paper presents novel findings regarding the conditional effects of industrial robot adoption on product quality enhancement. Thirdly, the policy implications of this paper provide actionable pathways for China's "Industrial Power" and "Quality Power" initiatives.

Key Words: industrial robot adoption; product quality; wage income gap; demand side

JEL Classification: L60, L15, O14

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2025.08.002

(责任编辑: 闫 梅)