

人力资本扩张、工业机器人与企业出口产品质量

方齐云 程子昂 胡 杨

摘要：本文基于2000—2013年的中国微观企业数据，以高校扩招为准自然实验，将人力资本扩张与工业机器人相联系，考察了两者的协同作用对于企业出口产品质量提升的影响。研究结果显示：从整体上来看，人力资本扩张与工业机器人的应用能形成正向协同作用，共同促进企业出口产品质量提升；人力资本扩张与工业机器人的协同作用对于企业出口产品质量提升的影响存在行业、融资情况以及地区三个层面的异质性，即主要促进的是劳动密集型和资本密集型行业企业、低融资约束企业以及东部地区企业的出口产品质量提升；机制检验表明，人力资本的扩张与工业机器人之间的协同作用主要通过中间品质量促进效应、研发促进效应以及生产率促进效应三种渠道共同提升了企业的出口产品质量；基于资源的再配置视角，从行业层面对出口产品质量进行分解，发现人力资本扩张与工业机器人的协同作用通过资源再配置效应促进了行业整体出口产品质量。

关键词：高校扩招；工业机器人；企业出口产品质量

[中图分类号] F74 [文献标识码] A [文章编号] 1002-4670 (2023) 6-0018-16

一、引言及文献综述

伴随“刘易斯拐点”的到来，中国人口红利构筑的廉价劳动力优势逐渐消退。同时，东南亚国家制造业成本优势凸显，中国制造业低成本竞争优势日趋式微，出口产品质量较低、技术复杂性不足等问题仍是阻碍中国从贸易大国迈向贸易强国的主要问题，甚至可能引发中国制造业陷入价值链“低端锁定”的风险。如何提升制造业企业出口产品质量，已成为中国出口贸易转型升级过程中亟待解决的问题。

在低要素成本的传统比较优势日渐消减的同时，以工业机器人和人力资本为代表的高级要素迅速积累，为中国制造业出口注入了新的竞争优势。国际机器人联合会（IFR）的资料显示，2021年中国工业机器人运营库存超过100万台，达到历史新高。工业机器人的高速推广和应用推动了中国制造业智能化转型，大幅提升了制造业企业的生产力和创新能力。既有研究表明，工业机器人的引入能有效减少生产

[收稿日期] 2022-12-20

[作者信息] 方齐云：华中科技大学经济学院教授；程子昂：华中科技大学经济学院博士研究生；胡杨（通讯作者）：华中科技大学经济学院博士研究生，电子信箱 d202281497@hust.edu.cn

过程中的错误率,提高加工精度(Frey and Osborne, 2017)^[1],提升企业生产率(吕越等, 2020)^[2],降低生产的边际成本(杨光和侯钰, 2020)^[3],提高资本回报率(Graetz and Michaels, 2018)^[4]。然而,工业机器人应用并非“机器换人”这一简单的要素替代过程,工业机器人作为技能偏向型技术,其生产效能的发挥依赖于技能劳动力要素的支撑(Acemoglu and Restrepo, 2018)^[5]。工业机器人在中国制造业企业的加速渗透,离不开人力资本积累所释放的“人才红利”的支撑作用。自1999年高校扩招以来,中国高等教育毕业生供给数量大幅提升,增加了高等教育毕业生在各行业劳动力市场的供给比例,扩大了高级人力资本的供给规模(Che and Zhang, 2018)^[6];方森辉和毛其淋, 2021^[7])。高校扩招所带动的高质量人力资本扩张,为工业机器人等先进生产技术的大规模应用提供了人才要素的支撑,加速工业机器人与制造业的深度融合,从而增强工业机器人提升企业出口竞争力的效率与效果。国务院颁布的《中国制造2025》指出“加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向”以及“完善多层次多类型人才培养体系,促进产业转型升级”。可见,为建设制造强国、实现中国制造高水平走出去,必须充分统筹协调人才与科技红利,提高制造业产品的技术含量与附加值。在这一背景下,中国的人力资本扩张是否能适应制造业工业机器人应用的需要,协同促进制造业企业出口产品质量提升?其影响渠道是什么?对这些问题的解答将加深对人力资本扩张与工业机器人之间联动机制的认识,有助于探寻中国制造业摆脱价值链“低端锁定”的破局之策。

现有研究主要从中间品进口(许家云等, 2017)^[8]、融资约束(张杰, 2015)^[9]、政府补贴(张洋, 2017)^[10]、生产效率与研发效率(施炳展和邵文波, 2014)^[11];苏丹妮等, 2018^[12])等方面探讨了出口产品质量提升的推动因素。其中,蔡震坤和綦建红(2021)^[13]、张可云等(2022)^[14]的研究与本文研究相近,着重考察工业机器人应用对出口产品质量提升的促进作用。前者认为工业机器人可以通过生产效率提升的机制渠道促进企业出口产品质量提升,后者则在此基础上,进一步探究了国内大市场优势对工业机器人提升出口产品质量的强化作用。然而,上述文献仅聚焦于工业机器人本身对于出口产品质量的影响,未关注到人力资本在机器人促进企业出口产品质量提升中的协同作用,这显然不能反映中国迈入“人才红利”时代下制造业智能化转型对出口贸易发展的独特优势。综上所述,现有文献尚未将人力资本、工业机器人的应用与出口产品质量纳入统一框架进行分析。故本文以2000—2013年间中国工业企业数据库、中国海关数据库的合并面板数据为研究样本,探究人力资本扩张与工业机器人两者之间是如何相互作用,共同促进企业出口产品质量的提升,以期对现有研究提供有益补充。

相较于现有研究,本文的边际贡献体现在如下几个方面:其一,研究视角上,本文立足于工业机器人应用并非简单“机器换人”的观点,着重探讨了工业机器人与人力资本的协同作用对企业出口产品质量的影响效果;其二,本文基于Hallak和Sivadasan(2009)^[15]的企业产品质量异质性模型的理论框架,论证并检验了工业机器人与人力资本的协同作用通过中间品质量促进效应、研发促进效应和生产率

促进效应三条影响渠道推动企业出口产品质量提升的内在机理；其三，本文基于行业层面的资源再配置视角，分析并验证了工业机器人与人力资本扩张如何通过资源的再配置效应提升出口产品的质量。

二、理论分析

新新贸易理论指出，效率与技术是企业出口竞争力的决定性因素，企业出口竞争力受到企业生产率、中间投入品质量以及研发效率三方面因素的影响。本文借鉴Hallak和Sivadasan（2009）的企业产品质量异质性模型的理论框架，综合考虑这三方面因素，从理论角度推导企业出口产品质量的影响渠道，进而梳理出高校扩招和机器人应用影响企业出口产品质量的作用机制，并在后文予以实证检验。

（一）理论框架设定

1. 需求

本文采用常数替代弹性（CES）形式效用函数表征代表性消费者的需求偏好：

$$U = \left[\int_{j \in \Omega} (p_j \lambda_j)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (1)$$

其中， p 为产品价格、 λ 为产品质量， j 为产品种类， σ ($\sigma > 1$) 为产品间替代弹性， Ω 为消费者所面对的可选产品集合。在给定预算 E 下，消费者对产品的需求可以通过求解效用最大化问题得到：

$$q(\lambda_j) = p_j^{-\sigma} \lambda_j^{\sigma-1} \frac{E}{P} \quad (2)$$

其中， P 为产品价格指数，即 $\int_{j \in \Omega} p_j^{1-\sigma} \lambda_j^{\sigma-1} dj$ 。

2. 供给

本文假定企业在生产率、研发效率和中间投入品质量均存在异质性，这三者共同决定生产利润。具体而言，企业生产率越高，其可变成本越低，企业技术研发效率越高，其用于质量研发的固定成本越低，同时更高质量中间品投入使得高质量产品的生产更容易实现。在柯布一道格拉斯生产函数的设定下，企业生产中的可变成本 MC 以及固定成本 F 刻画如下：

$$\begin{aligned} MC(\lambda; R, H) &= \frac{C_f(\varepsilon(R, H))}{\varphi(R, H)} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)} \right)^\alpha \\ F(\lambda; R, H) &= F_0 + \frac{f}{\theta(R, H)} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)} \right)^\beta \end{aligned} \quad (3)$$

其中， α 为质量的成本弹性 ($0 < \alpha < 1$)^①， $\varphi(R, H)$ 为企业生产率， $\varepsilon(R, H)$ 为中间品质量， $C_f(\varepsilon)$ 为中间品价格， F_0 为与质量无关的固定成本， $\theta(R, H)$ 为研发效率， f 为质量的固定成本系数且为常数， β 为质量的固定成本弹性 ($0 < \beta < 1$)。

^①参照 Hallak 和 Sivadasan（2009）的方法，设定可变成本的质量弹性 α 与固定成本的质量弹性 β 取值在 0~1 之间，这将保证可变成本与固定成本随质量增加而增长，且增长速度不会过快。

中间品价格遵循迪克西特—斯蒂格利茨 (DS) 垄断竞争模型下的定价规律 $C_i(\varepsilon) = B\varepsilon^\alpha$, B 为常数。考虑到产品的质量建立在中间投入品质量之上 (许家云等, 2017; 刘啟仁和铁瑛, 2020^[16]), 而中间品的投入成本已经通过中间品价格形式进行刻画, 故本文采用 $\left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)}\right)^\alpha$ 刻画产品生产中质量提升的边际成本, $\left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)}\right)^\beta$ 刻画质量提升的固定成本。此外, R 和 H 分别为机器人渗透率和人力资本水平, 二者共同决定了企业的生产率、研发效率和中间投入品质量。

3. 均衡

对于 CES 形式下的市场需求, 借用 DS 垄断竞争的结论, 厂商定价应满足:

$$p(\lambda; R, H) = \frac{\sigma}{\sigma - 1} MC(\lambda; R, H) \quad (4)$$

将公式 (4) 与公式 (2) 代入利润函数 $\Pi = (p - MC)q - F$ 后得到:

$$\begin{aligned} \Pi(\lambda; R, H) = & \frac{1}{\sigma - 1} \left(\frac{\sigma}{\sigma - 1}\right)^{-\sigma} \left[\frac{C_i(\varepsilon(R, H))}{\varphi(R, H)} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)}\right)^\alpha \right]^{1-\sigma} \\ & \lambda_j^{\sigma-1} \frac{E}{P} - F_0 - \frac{f}{\theta(R, H)} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon(R, H)}\right)^\beta \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 可得到满足利润最大化下的企业的最优出口产品质量为:

$$\lambda = \left(\frac{J}{f} [\varphi(R, H)]^{\sigma-1} \theta(R, H) [\varepsilon(R, H)]^\beta \right)^{\frac{1}{\beta'}} \quad (6)$$

其中, $\beta' = \beta - (1 - \alpha)(\sigma - 1) > 0$, $J = \frac{1}{\sigma - 1} \left(\frac{\sigma}{\sigma - 1}\right)^{-\sigma} \frac{EB^{1-\sigma}}{P}$ 。

(二) 比较静态分析

进一步对公式 (6) 取对数形式可以得到:

$$\ln \lambda = \frac{\sigma - 1}{\beta'} \ln \varphi(R, H) + \frac{1}{\beta'} \ln \theta(R, H) + \frac{\beta}{\beta'} \ln \varepsilon(R, H) + \eta \quad (7)$$

其中, $\eta = \frac{1}{\beta'} \ln J - \frac{1}{\beta'} \ln f$ 。由式 (7) 可知, 工业机器人应用和人力资本可以通过生产率 $\varphi(R, H)$ 、研发效率 $\theta(R, H)$ 和中间品质量 $\varepsilon(R, H)$ 三条机制渠道影响企业产品质量。

1. 生产率促进效应

由公式 (7) 可以推导得到 $\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \ln \varphi(R, H)} = \frac{\sigma - 1}{\beta'} > 0$, 即生产效率提高是提升企业产品质量的渠道, 这与已有的研究结论一致 (苏丹妮等, 2018; 许家云等, 2017)。而工业机器人可以直接作用于生产效率, 作为生产自动化的表现形式, 机器人的应用具有提升生产效率的直接效应。但工业机器人作为一种智能制造设备, 需要技能劳动力进行编程、操作和维护, 即机器人与人力资本之间存在互补关系 (李磊和徐大策, 2020)^[17], 工业机器人对生产效率的促进作用依赖于人力资

本。而高校扩招所形成的人力资本扩张通过技能劳动力的技术载体功能进一步促进工业机器人应用对生产效率的提升效应。此外，尽管工业机器人应用能实现简单重复性生产环节的自动化，替代了低技能劳动力并形成产出规模效应，但在非自动化生产环节对高技能劳动力产生了更大的需求（李磊等，2021）^[18]。人力资本扩张不仅通过提高劳动生产率提升非自动化环节生产效率，还通过提升人力资本密度缓解企业对技能劳动力的获取成本，促进非自动化环节生产效率（周茂等，2019）^[19]。据此，本文提出如下假说。

假说1：人力资本扩张和工业机器人应用在企业出口产品质量提升过程中发挥协同作用，并通过提高生产率促进企业出口产品质量提升。

2. 研发促进效应

由公式（7）可以推导得到 $\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \ln \theta(R, H)} = \frac{1}{\beta'} > 0$ ，即研发效率的提高是提升企业产品质量的渠道，这与已有研究结论一致（施炳展和邵文波，2014；祝树金等，2019^[20]）。工业机器人作为新兴高质量资本品，是一种物化技术进步的体现，对企业创新活动具有直接的技术溢出作用（Dixon，2021）^[21]，有助于企业研发效率的提升。另外，工业机器人所内含的智能化技术较一般技术更容易改进（Hanson，2000）^[22]，使得基于工业机器人的创新更具有效率优势。而人力资本扩张能通过强化企业在研发活动中的比较优势（Che and Zhang，2018），提高利用工业机器人实现研发创新的效率。此外，人力资本与工业机器人应用在创新活动中同样存在互补作用（诸竹君等，2022）^[23]。机器人对研发效率的促进作用建立在研发人员的技能水平之上，人力资本扩张所形成的“高技能劳动力蓄水池”方便企业获取研发人员，能进一步强化工业机器人对研发效率的促进作用。据此，本文提出如下假说。

假说2：人力资本扩张在工业机器人应用促进企业出口产品质量提升过程中发挥协同作用，通过提升研发效率促进企业出口产品质量提升。

3. 中间品质量促进效应

由公式（7）可以推导得到 $\frac{\partial \ln \lambda}{\partial \ln \varepsilon(R, H)} = \frac{\beta}{\beta'} > 0$ ，即中间品质量提高是提升企业产品质量的渠道，这与已有研究结论一致（方森辉和毛其淋，2021；Manova and Yu，2017）^[24]。高质量中间品具有内嵌技术的特征（Blalock and Veloso，2007^[25]；Nishioka and Ripoll，2012^[26]），其投入和加工既需要先进的生产设备与之配套（张先锋等，2019）^[27]，更依赖与之匹配的劳动力技能水平（方森辉和毛其淋，2021），即工业机器人应用和人力资本扩张在引进高质量中间品的过程中也发挥互补作用。此外，工业机器人作为一种高端制造设备，其应用将推动产业迈入技术难度更高的分工环节（吕越等，2020），引致对高质量中间品的投入需求。但参与高端产业分工需要以满足人力资本等支持性条件为前提（唐海燕和张会清，2009）^[28]。此时，高校扩招形成的人力资本扩张为企业依托工业机器人迈入产业链高端环节提供了契机，并引致对更高质量中间品的投入需求。据此，本文提出以下假说。

假说3：人力资本扩张和工业机器人在促进企业中间投入品质量提升的过程中发挥协同作用，通过中间品质量促进效应提高出口产品质量。

三、研究方法、模型和数据

(一) 数据来源与处理

本文的研究样本数据来源与匹配过程如下：第一步，将2000—2013年中国工业企业数据库与IFR行业层面的机器人数据进行匹配，本文参考吕越等（2020）的方法，将从IFR中获取的中国各行业机器人数据转化为《国民经济行业分类》的二位行业数据，再与企业数据进行合并；第二步，借鉴Yu（2015）^[29]的方法，将匹配好行业机器人的中国工业企业数据库与处理后的中国海关数据库^①进行匹配，并剔除存在缺失数值的企业；第三步，依据二位编码的行业分类，将企业数据与行业层面数据进行匹配。最终得到本文的研究数据。

(二) 核心变量测度

1. 企业出口质量 (Quality)

本文借鉴Amiti和Khandelwal（2013）^[30]的做法，设定进口国 c 消费者 t 年对企业 f 出口的产品消费量为：

$$q_{fct} = p_{fct}^{-\sigma} \lambda_{fct}^{\sigma-1} \frac{E_{ct}}{P_{ct}} \quad (8)$$

取对数整理之后可以得到：

$$\ln q_{fct} = (\ln E_{ct} - \ln P_{ct}) - \sigma \ln p_{fct} + \varepsilon_{fct} \quad (9)$$

其中， $(\ln E_{ct} - \ln P_{ct})$ 表示为进口国一年份二维虚拟变量，分别用于控制随国家与时间变化的变量， q_{fct} 代表企业 f 在 t 年出口到 c 国的产品价格， ε_{fct} 为包含企业出口产品质量的信息残差项。借鉴施炳展和邵文波（2014）的思路^②，在考虑内生性的前提下，测度企业 f 在 t 年对 c 国的出口产品质量为：

$$Quality_{fct} = \frac{\hat{\varepsilon}_{fct}}{\sigma - 1} = \frac{\ln q_{fct} - \ln \hat{q}_{fct}}{\sigma - 1} \quad (10)$$

对式（10）求得的质量进行中心化处理^③，得到无单位指标后，再以企业的出口额为权重对指标进行加总，得到企业 f 在 t 年的出口产品质量。

2. 人力资本强度 (Human)

本文借鉴Che和Zhang（2018）的方法，采用Ciccone和Papaioannou（2009）^[31]提供的1980年美国高级人力资本密度衡量人力资本强度，原因如下：（1）Che和Zhang（2018）指出美国1980年各产业人力资本密度的均值与中国各行业具有较强的相关性；（2）20世纪70年代，美国行业技术水平能较为客观地反

①具体数据匹配方法未列出，可登陆对外经济贸易大学学术刊物部网站“刊文补充数据查询”栏目查阅、下载。

②具体处理方法查阅同前。

③具体处理过程查阅同前。

映世界的技术前沿水平，故利用美国的产业特征来表征包括中国在内的人力资本特征具有一定的合理性（周茂等，2019）；（3）该指标的观测时间为1980年，与本文其他的样本观测期相隔较远，保证了较好的分组外生性；（4）该指标缓解了政策冲击带来的资源配置扭曲。研究表明，美国的整体劳动力市场较为灵活，相形之下中国的劳动市场则产生了较为严重的资源配置扭曲（Hsieh and Klenow, 2009）^[32]，故采用这一指标表征中国人力资本强度更具合理性。

3. 工业机器人水平测度（Robot）

借鉴 Acemoglu 和 Restrepo（2020）^[33]、刘斌和潘彤（2020）的方法，本文使用工业机器人密度，即每千名就业人员操作的工业机器人数量进行衡量。

4. 控制变量

企业层面控制变量为：企业规模（Size），以总资产的对数形式表示；企业成立年限（Age），以当年年份与成立年份之差加1的对数值表示；企业融资约束水平（Lev），以企业负债总额占总资产的比例表示；企业利润率（Profit），以企业利润总额占企业总收入的比例表示；企业资本密集度（Flr），以企业人均固定资产的对数形式表示。行业层面控制变量为：行业研发强度（Rd），以各行业规模以上企业内部研发投入的对数形式表示；行业规模（Scale），以各行业规模以上企业个数的对数形式表示；行业利用外资水平（Fdi），以各行业规模以上企业的实际利用外资额的对数形式表示。

（三）模型设定

为验证人力资本扩张与工业机器人对企业出口产品质量的影响，本文构建基准回归模型如下：

$$\begin{aligned} Quality_{fit} = & \beta_0 + \beta_1 Human_i \times Post_t + \beta_2 Robot_{it} + \beta_3 Human_i \times Post_t \times Robot_{it} \\ & + X' \tau + \omega_i + \mu_i + \mu_f + \varepsilon_{fit} \end{aligned} \quad (11)$$

其中，被解释变量 $Quality_{fit}$ 表示 i 行业企业 f 在 t 年的出口质量。核心解释变量为 $Human_i \times Post_t \times Robot_{it}$ ，主要包含三个部分： $Robot_{it}$ 表示行业工业机器人水平， $Human_i$ 表示行业人力资本强度。由于人力资本供给的增加需要毕业学生在真正走上工作岗位后才能实现，故本文借鉴周茂等（2019）的方法，按照4年制本科来计算，若样本所在年份为2003年及之后，设时间虚拟变量 $Post = 1$ ，反之则为0。交互项系数 β_3 代表了人力资本扩张与工业机器人的协同作用对于企业出口产品质量的影响，而 X 为一组控制变量， ω_i 、 μ_i 、 μ_f 分别表示年份、行业、个体固定效应， ε_{fit} 表示随机扰动项^①。

四、实证结果及分析

（一）基准回归

本文采用面板固定效应模型，分别控制年份、行业以及个体固定效应。人力资本扩张与工业机器人对企业出口产品质量影响的估计结果见表1。

^①描述性统计查阅同前。

表1第(1)列汇报了不添加交互项时人力资本扩张与工业机器人对企业出口产品质量影响的计量估计结果^①。结果显示,人力资本扩张与工业机器人的估计系数在1%水平上显著为正,说明在没有考虑交互作用的情况下,人力资本扩张与工业机器人均显著提升了企业出口产品质量。在第(1)列的基础上,第(2)列报告了添加交互项后的结果,此时核心变量的估计系数在1%水平上显著为正,这表明高校扩招带来人力资本的扩张能形成与工业机器人的协同作用,共同提升企业出口产品质量。第(3)列进一步加入了企业和行业控制变量,此时核心系数仍在5%的水平上显著为正,表明基准回归结果具有稳健性。

表1 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	<i>Quality</i>	<i>Quality</i>	<i>Quality</i>
<i>Human×Post</i>	0.0375 *** (4.497)	0.0368 *** (4.408)	0.0333 *** (3.453)
<i>Robot</i>	0.0031 *** (8.290)	0.0007 (0.809)	0.0003 (0.321)
<i>Human×Post×Robot</i>		0.0218 *** (2.932)	0.0172 ** (2.193)
控制变量	否	否	是
年份 <i>FE</i>	是	是	是
个体 <i>FE</i>	是	是	是
行业 <i>FE</i>	是	是	是
R ²	0.811	0.811	0.820
N	337 706	337 706	282 621

注:括号内为稳健标准误调整的t值;***、**分别表示在1%、5%的显著性水平下显著。

(二) 稳健性检验

1. 内生性问题

考虑到企业的出口产品质量与工业机器人可能会因为逆向因果导致内生性问题。本文借鉴王永钦和董雯(2020)^[35]的方法构建工具变量,采用美国同行业工业机器人渗透率,即美国*i*行业*t*年工业机器人存量占美国*i*行业2000年(基期)就业人数的比例,作为我国工业机器人安装量的工具变量。理由如下:一方面,美国与中国均为工业机器人的应用大国,在工业机器人的应用发展过程中存在着诸多联系,满足工具变量的相关性;另一方面,美国各行业的工业机器人情况难以直接影响中国企业的出口产品质量,满足工具变量的外生性。表2第(1)列报告了采用工具变量的估计结果,结果显示,*Anderson LM*与*C-D Wald F*统计量分别拒绝不可识别与弱工具变量假设。此时核心系数在5%的水平上显著为正,表明了结论的稳健性。

^①基准回归结果中控制变量估计系数查阅同前。

2. 替换解释变量

尽管前文已阐述采用美国行业层面的人力资本密集度来表征我国产业具备良好的外生性和合理性，但中美两国之间的劳动力市场也存在一定的差异。故借鉴周茂等（2019）的方法，利用我国2004年工业普查数据中从业人员学历信息构造中国产业的人力资本密度重新对模型进行回归，结果如表2第（2）列所示，尽管此时核心系数的估计值有所减小，但仍在5%的显著性水平上为正，并不会实质性地改变基准模型的估计结果。

3. 剔除其他政策影响

考虑到加入世界贸易组织（WTO）对中国出口贸易的影响，本文参考程锐和马莉莉（2020）^[36]的方法，将样本限定为2002年及之后。此外，考虑到金融危机对中国出口贸易的影响，采用2008年前的数据进行回归，对应结果分别如表2第（3）、（4）列所示，发现在剔除其他政策影响后^①，结论仍然成立。

表2 稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	IV法	中国行业测算	WTO冲击	金融危机
<i>Human×Post×Robot</i>	0.1033** (2.160)	0.0105** (1.882)	0.0245*** (2.936)	0.0245*** (2.925)
控制变量	是	是	是	是
年份FE	是	是	是	是
个体FE	是	是	是	是
行业FE	是	是	是	是
<i>Anderson LM</i>	1939.527			
<i>C-D Wald F</i>	1667.388			
R ²	0.217	0.820	0.823	0.770
N	259 830	282 621	265 260	146 382

注：括号内为稳健标准误调整的t值；***、**分别表示在1%、5%的显著性水平下显著。

(三) 异质性检验

1. 行业异质性分析

由于不同行业的技术特性存在差异，对人力资本和技术水平也存在不同需求，需要进一步考察不同行业的情况。故参考戴翔（2015）^[37]的方法，将企业分为劳动密集型、资本密集型和技术密集型分别进行回归。回归结果如表3第（1）—（3）列所示，其中第（1）、（2）列的核心系数在1%的水平上显著，为0.3689和0.0721，说明我国人力资本扩张与工业机器人的协同作用主要有助于提升劳动密集型和资本密集型企业的出口产品质量，对劳动密集型企业的促进作用更大。而第

^①此外还考虑了2003年研究生扩招政策以及毕业月份为7月左右可能造成的影响，具体回归结果查阅同前。

(3) 列显示技术密集型企业系数在 10% 的水平上不显著。这可能源于技术密集型行业的特殊性：其一，专业和高技术要求的抽象任务需要与之匹配的解决和创造能力 (Autor et al., 2003)^[38]，技术密集型行业的企业通常扮演“头雁”的角色 (李绍荣和李雯轩, 2018)^[39]，对于这类企业来说，要通过引入工业机器人来提高出口产品质量，需要更加专业和核心的技术人员参与才能得以实现，并非仅靠人力资本扩张就能推动该行业生产体系的智能化转型；其二，现有文献认为，高校扩招可能对尖端技能型人才产生了信号干扰作用，高校扩招在扩大人力资本供给的同时也弱化了高等教育文凭的有效性 (邵宜航和徐菁, 2017)^[40]，使得技术密集型企业难以获取所需的尖端人才推动工业机器人技术与生产体系相融合，弱化了工业机器人应用对出口产品质量的提升作用。这表明我国仍需加强对核心技术人才的培养，以推动工业机器人应用与技术密集型行业生产体系的紧密融合。

表 3 行业异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)
	劳动密集型	资本密集型	技术密集型
<i>Human×Post×Robot</i>	0.3689*** (4.742)	0.0721*** (4.500)	0.3572 (1.148)
控制变量	是	是	是
年份 <i>FE</i>	是	是	是
个体 <i>FE</i>	是	是	是
R^2	0.823	0.814	0.807
N	92 642	118 374	81 776

注：括号内为稳健标准误调整的 t 值；***、** 分别表示在 1%、5% 的显著性水平下显著。

2. 企业异质性分析

考虑到高级人力资本的获取以及工业机器人的引入是建立在企业的资金基础上，不同的融资情况可能存在差异。故参考张璇等 (2019)^[41] 的方法，采用 SA 指数测度企业的融资情况^①，依据中位数分为高融资约束企业和低融资约束企业，回归结果如表 4 第 (1)、(2) 列所示。结果表明，仅第 (1) 列的系数在 5% 的水平上显著为正，即人力资本扩张与工业机器人的协同作用主要促进的是低融资约束企业的出口产品质量，而对于高融资约束企业的出口产品质量则没有明显促进作用，这说明充足的资金是企业提升出口产品质量的前提条件。由于工业机器人本身的精密性，在高级人力资本实现对其的应用和再创造过程中必然伴随着大量的调整成本，并存在极大的失败风险。当企业没有充足的资金支持时，不仅难以对高级人力资本产生足够的激励，阻碍高级人力资本与工业机器人的有机结合，还可能会因为招聘高级人力资本和引入工业机器人的高成本占用企业研发资金，不利于出口产品质量的提升。

①测算公式查阅同前。

3. 地区异质性分析

考虑到不同地区在高等教育资源以及对现代化生产设备的引入存在差异,可能对出口产品质量产生不同影响,本文对处于不同地区的企业进行异质性分析。基于企业所处省份划分为东部地区企业和中西部地区企业,回归结果如表4第(3)、(4)列所示。结果显示,相比于中西部地区,人力资本扩张与工业机器人的协同作用主要促进了东部地区企业的出口产品质量,这源于该地区自改革开放以来积累了大量的人力资本和技术,在人力资本扩张后拥有获取高质量人力资本的先天优势,并通过人力资本和技术积累效应提升企业的出口产品质量,此外该地区大多为出口企业,在出口产品市场上的竞争更激烈,企业往往有更大的意愿提升出口产品质量。

表4 企业异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	低融资约束	高融资约束	东部地区	中西部地区
<i>Human</i> × <i>Post</i> × <i>Robot</i>	0.0275** (2.450)	0.0014 (0.122)	0.0168** (1.966)	0.0188 (0.969)
控制变量	是	是	是	是
年份 <i>FE</i>	是	是	是	是
个体 <i>FE</i>	是	是	是	是
行业 <i>FE</i>	是	是	是	是
R ²	0.841	0.833	0.820	0.819
N	159 987	122 634	232 575	50 046

注:括号内为稳健标准误差调整的t值;**表示在5%的显著性水平下显著。

五、机制检验与分析

本部分采用实证模型,从中间品质量促进效应、研发促进效应以及生产率促进效应三种渠道考察人力资本扩张与工业机器人的协同作用对企业出口产品质量的影响机制。

(一) 中间品质量促进效应

既有文献已阐述包含先进技术的高质量中间品进口对出口产品质量具有直接的提升作用(Manova and Yu, 2017)。参考江艇(2022)^[42]提出的研究建议,在此部分仅验证人力资本扩张与工业机器人的交互作用对于中介变量的影响,即将式(11)的被解释变量替换为中介变量进行机制检验。借鉴祝树金和汤超(2020)^[43]、施炳展和曾祥菲(2015)^[44]的做法,对企业进口中间品质量(*Input*)进行测度^①并代入式(11)。回归结果见表5第(1)列,其中核心变量的系数在10%的水平上显著为正,表明人力资本扩张与工业机器人的协同作用有助于通过提升企业中间品质量来提高出口产品质量。

①测算方法查阅同前。

(二) 研发促进效应

既有文献中,已阐述企业创新能力的增强能提高固定成本投入效率,为出口产品质量升级提供了必要的知识驱动和效率改进基础(施炳展和邵文波,2014)。故本文借鉴 Xu 和 Lu (2009)^[45]的做法,采用企业无形资产的资产占比代表研发效率(R&D),将其作为被解释变量代入式(11)进行回归,结果如表5第(2)列所示,此时核心变量的系数在5%的显著性水平上为正,表明人力资本扩张与工业机器人的协同作用通过促进企业研发效率来提升出口产品质量。

(三) 生产率促进效应

既有文献中,已阐述生产率的提升降低了企业可变成本,有助于形成内部资金,进而通过研发投入促进质量升级(苏丹妮等,2018)。本文采用 ACF 法估计企业生产率(TFP),并将其作为被解释变量,代入式(11)进行回归,结果见表5第(3)列,此时核心解释变量系数在1%水平上显著为正,说明人力资本扩张与工业机器人的协同作用通过促进企业生产率来提升出口产品质量。

表5 机制检验结果

变量	(1)	(2)	(3)
	<i>Input</i>	<i>R&D</i>	<i>TFP</i>
<i>Human×Post×Robot</i>	0.0246* (1.951)	0.0158** (2.310)	0.1087*** (5.592)
控制变量	是	是	是
年份 <i>FE</i>	是	是	是
个体 <i>FE</i>	是	是	是
行业 <i>FE</i>	是	是	是
R ²	0.811	0.744	0.739
N	273 549	274 217	192 070

注:括号内为稳健标准误调整的t值;***、**和*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平下显著。

六、进一步分析:基于资源再配置视角

根据 Sutton (1991)^[46]的内生性沉没成本理论,当投入的高质量人力资本与工业机器人形成良好适配关系,成为企业的核心竞争力时,在规模报酬递增的激励下,企业会充分利用各类创新要素以维持甚至提升这一核心竞争力。从行业层面来说,工业机器人的引入与人力资本扩张加快了相关知识和技术在行业间的流通速度,改善了资源的配置效率。故本文基于资源再配置的视角,进一步探究人力资本扩张与工业机器人是如何通过行业资源的配置作用来提升出口产品质量的。采用苏丹妮等(2018)的方法,对出口产品质量变动进行分解,将行业层面的总体出口质量变化分解为4项,具体分解公式如下:

$$\Delta Q_t = \underbrace{\Delta \bar{Q}_S}_{\text{企业内效应}} + \underbrace{\Delta Cov_S}_{\text{企业间效应}} + \underbrace{r_{Et}(Q_{Et} - Q_{St})}_{\text{进入企业效应}} + \underbrace{r_{X,t-1}(Q_{S,t-1} - Q_{X,t-1})}_{\text{退出企业效应}} \quad (12)$$

再配置效应

其中, ΔQ_t 表示第 $t-1$ 期到第 t 期的行业内所有企业总体产品质量的变动情况, 下标 S 表示在第 t 期仍存活的企业, E 和 X 则分别表示进入企业和退出企业。

第一项为企业内效应 $\Delta \bar{Q}_S = \frac{1}{n_{St}} \sum_{f \in S} q_{ft} - \frac{1}{n_{S, t-1}} \sum_{f \in S} q_{f, t-1}$, 其中, q_{ft} 代表企业 f 在第 t 期

的出口产品质量, n_{St} 代表企业在第 t 期的数量, 该项表示的是存活企业自身出口产品质量变化导致的总体产品质量变动; 第二项为企业间效应 $\Delta Cov_S = Cov_{St} -$

$Cov_{S, t-1}$, 其中, $Cov_{St} = \sum_{f \in S} (r_{ft} - \frac{1}{n_{St}} \sum_{f \in S} r_{ft}) (q_{ft} - \frac{1}{n_{St}} \sum_{f \in S} q_{ft})$, r_{ft} 代表企业 f 在第 t 期

的出口份额, 该项表示存活企业的出口市场份额变化所导致的总体产品质量变动;

第三、四项则分别为进入企业效应 $r_{Et}(Q_{Et} - Q_{St}) = \sum_{f \in E} r_{ft} (\sum_{f \in E} \frac{r_{ft}}{\sum_{f \in E} r_{ft}} q_{ft} - \sum_{f \in S} \frac{r_{ft}}{\sum_{f \in S} r_{ft}} q_{ft})$

和退出企业效应 $r_{X, t-1}(Q_{S, t-1} - Q_{X, t-1}) = \sum_{f \in X} r_{f, t-1} (\sum_{f \in S} \frac{r_{f, t-1}}{\sum_{f \in S} r_{f, t-1}} q_{f, t-1} - \sum_{f \in X} \frac{r_{f, t-1}}{\sum_{f \in X} r_{f, t-1}}$

$q_{f, t-1})$, 表示企业进入和退出导致的总体产品质量变动。第一项表示的是“纯粹”

的质量变化, 其余各项则是由于行业内市场结构变化而导致的质量变化情况, 称为资源再配置效应。为考察人力资本扩张与工业机器人之间所产生的协同作用是否能通过行业之间的资源再配置来提升出口产品质量, 本文分别将资源再配置效应以及其子指标(企业间效应、进入企业效应、退出企业效应)作为被解释变量代入行业层面的式(11)进行回归^①, 结果如表6所示。

表6第(1)列的核心系数在5%的水平上显著为正, 说明人力资本扩张与工业机器人的交互作用优化了行业内部的资源配置效率, 进而促进了行业出口产品质量。第(2)、(4)列的系数均在10%的水平上显著为正, 说明从具体路径来看, 人力资本扩张与工业机器人的协同作用的再配置效应主要是通过存活企业间的配置效应和退出企业效应这两条途径来促进出口产品质量的提升。

表6 资源再配置机制的相关分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	资源再配置效应	企业间效应	进入企业效应	退出企业效应
<i>Human×Post×Robot</i>	0.0283** (2.034)	0.0257* (1.830)	-0.0030 (-1.270)	0.0059* (1.706)
控制变量	是	是	是	是
年份 FE	是	是	是	是
行业 FE	是	是	是	是
R ²	0.1058	0.0854	0.0491	0.1512
N	3 333	3 570	3 598	3 681

注: 括号内为稳健标准误调整的 t 值; **、* 表示在 5%、10% 的显著性水平下显著。

①形式与基准模型一致, 控制变量仅保留行业层面, 控制年份和行业固定效应; 各效应占比查阅同前。

七、结论与建议

本文以2000—2013年中国工业企业数据库与中国海关数据库的匹配数据作为研究样本,探究了人力资本扩张与工业机器人协同作用对出口产品质量的影响,研究结论表明:首先,人力资本扩张与工业机器人形成协同作用,共同促进了企业出口产品质量提升,但这种促进作用主要体现在劳动密集型和资本密集型行业、融资约束较低企业以及东部地区企业;其次,从影响渠道来说,人力资本扩张与工业机器人之间的协同作用主要通过中间品质量促进效应、研发促进效应以及生产率促进效应促进企业出口产品质量的提升;最后,基于资源再配置视角,人力资本扩张与工业机器人的协同作用提高了行业内的资源配置效率,并通过资源的再配置效应提升了行业整体出口产品质量。

上述结论为实现人力资本扩张与工业机器人的协同机制,共同推动企业出口高质量发展提供了政策启示:第一,为充分享受工业机器人这一新型技术的红利,政府要加快构建创新高质量人才培养体系,发展教育事业,为企业提供更加充裕的高级人才供给,并通过政策扶持等方式支持企业对人工智能相关创新人才的专业化和“互补化”培训,提高企业人才“干中学”效率,缩短引入工业机器人的回报周期;第二,为化解高技术含量行业的困境,需要鼓励和支持扩展机器人在技术密集型行业的应用规模和应用深度,为未来更高层级的“人机协同”积累经验;第三,政府应当充分利用市场竞争机制,促进创新要素流动,通过正向竞争策略为企业出口产品质量的提升提供有利环境。

[参考文献]

- [1] FREY C B, OSBORNE M A. The Future of Employment: How Susceptible are Jobs to Computerisation? [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017 (114): 254-280.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] GRAETZ G, MICHAELS G. Robots at Work [J]. *Review of Economics and Statistics*, 2018, 100 (5): 753-768.
- [5] ACEMOGLU D, RESTREPO P. The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares and Employment [J]. *American Economic Review*, 2018, 108 (6): 1488-1542.
- [6] CHE Y, ZHANG L. Human Capital, Technology Adoption and Firm Performance: Impacts of China's Higher Education Expansion in the Late 1990s [J]. *Economic Journal*, 2018 (614): 75-105.
- [7] 方森辉, 毛其淋. 高校扩招、人力资本与企业出口质量 [J]. *中国工业经济*, 2021 (11): 97-115.
- [8] 许家云, 毛其淋, 胡鞍钢. 中间品进口与企业出口产品质量升级: 基于中国证据的研究 [J]. *世界经济*, 2017 (3): 52-75.
- [9] 张杰. 金融抑制、融资约束与出口产品质量 [J]. *金融研究*, 2015 (6): 64-79.
- [10] 张洋. 政府补贴提高了中国制造业企业出口产品质量吗 [J]. *国际贸易问题*, 2017 (4): 27-37.
- [11] 施炳展, 邵文波. 中国企业出口产品质量测算及其决定因素——培育出口竞争新优势的微观视角 [J]. *管理世界*, 2014 (9): 90-106.
- [12] 苏丹妮, 盛斌, 邵朝对. 产业集聚与企业出口产品质量升级 [J]. *中国工业经济*, 2018 (11): 117-135.

- [13] 蔡震坤, 基建红. 工业机器人的应用是否提升了企业出口产品质量——来自中国企业数据的证据 [J]. 国际贸易问题, 2021 (10): 17-33.
- [14] 张可云, 庄宗武, 韩峰. 国内超大规模市场、人工智能应用与制造业出口产品质量升级 [J]. 经济纵横, 2022 (7): 1-12+137.
- [15] HALLAK J C, SIVADASAN J. Firms' Exporting Behavior under Quality Constraints [R]. National Bureau of Economic Research, 2009.
- [16] 刘敏仁, 铁瑛. 企业雇佣结构、中间投入与出口产品质量变动之谜 [J]. 管理世界, 2020 (3): 1-23.
- [17] 李磊, 徐大策. 机器人能否提升企业劳动生产率? ——机制与事实 [J]. 产业经济研究, 2020 (3): 127-142.
- [18] 李磊, 王小霞, 包群. 机器人的就业效应: 机制与中国经验 [J]. 管理世界, 2021 (9): 104-119.
- [19] 周茂, 李雨浓, 姚星, 等. 人力资本扩张与中国城市制造业出口升级: 来自高校扩招的证据 [J]. 管理世界, 2019, 35 (5): 64-77+198-199.
- [20] 祝树金, 谢煜, 段凡. 制造业服务化、技术创新与企业出口产品质量 [J]. 经济评论, 2019 (6): 3-16.
- [21] DIXON J, HONG B, WU L. The Robot Revolution; Managerial and Employment Consequences for Firms [J]. Management Science, 2021, 67 (9): 5586-5605.
- [22] HANSON R D. Economic Growth Given Machine Intelligence [C]. 2000.
- [23] 诸竹君, 袁逸铭, 焦嘉嘉. 工业自动化与制造业创新行为 [J]. 中国工业经济, 2022 (7): 84-102.
- [24] MANOVA K, YU Z. Multi-product Firms and Product Quality [J]. Journal of International Economics, 2017 (109): 116-137.
- [25] BLALOCK G, VELOSO F M. Imports, Productivity Growth and Supply Chain Learning [J]. World Development, 2007, 35 (7): 1134-1151.
- [26] NISHIOKA S, RIPOLL M. Productivity, Trade and the R&D Content of Intermediate Inputs [J]. European Economic Review, 2012, 56 (8): 1573-1592.
- [27] 张先锋, 谢正莹, 蒋慕超. 中间品进口对企业产能利用率的影响: 基于中间品进口的数量、种类与质量维度 [J]. 世界经济研究, 2019 (1): 121-134+137.
- [28] 唐海燕, 张会清. 产品内国际分工与发展中国家的价值链提升 [J]. 经济研究, 2009, 44 (9): 81-93.
- [29] YU M J. Processing Trade, Tariff Reductions and Firm Productivity: Evidence from Chinese Firms [J]. The Economic Journal, 2015, 125 (585): 943-988.
- [30] AMITI M, KHANDELWAL A K. Import Competition and Quality Upgrading [J]. Review of Economics and Statistics, 2013, 95 (2): 476-490.
- [31] CICCONE A, PAPAIOANNOU E. Human Capital, The Structure of Production and Growth [J]. The Review of Economics and Statistics, 2009, 91 (1): 66-82.
- [32] HSIEH C T, KLEINOW P J. Misallocation and Manufacturing TFP in China and India [J]. The Quarterly Journal of Economics, 2009, 124 (4): 1403-1448.
- [33] ACEMOGLU D, RESTREPO P. Robots and Jobs: Evidence from U. S. Labor Markets [J]. Journal of Political Economy, 2020, 128 (6): 2188-2244.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 程锐, 马莉莉. 高级人力资本扩张与制造业出口产品质量升级 [J]. 国际贸易问题, 2020 (8): 36-51.
- [37] 戴翔. 中国制造业国际竞争力——基于贸易附加值的测算 [J]. 中国工业经济, 2015 (1): 78-88.
- [38] AUTOR D H, LEVY F, MURNANE R J. The Skill Content of Recent Technological Change: An Empirical Exploration [J]. The Quarterly Journal of Economics, 2003, 118 (4): 1279-1333.
- [39] 李绍荣, 李雯轩. 我国区域间产业集群的“雁阵模式” ——基于各省优势产业的分析 [J]. 经济动态

- 态, 2018 (1): 86-102.
- [40] 邵宜航, 徐菁. 高等教育扩张的增长效应: 人力资本提升还是信号干扰 [J]. 财贸经济, 2017, 38 (11): 5-22.
- [41] 张璇, 李子健, 李春涛. 银行业竞争、融资约束与企业创新——中国工业企业的经验证据 [J]. 金融研究, 2019 (10): 98-116.
- [42] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应 [J]. 中国工业经济, 2022 (5): 100-120.
- [43] 祝树金, 汤超. 企业上市对出口产品质量升级的影响——基于中国制造业企业的实证研究 [J]. 中国工业经济, 2020 (2): 117-135+1-8.
- [44] 施炳展, 曾祥菲. 中国企业进口产品质量测算与事实 [J]. 世界经济, 2015, 38 (3): 57-77.
- [45] XU B, LU J. Foreign Direct Investment, Processing Trade and the Sophistication of China's Exports [J]. China Economic Review, 2009, 20 (3): 425-439.
- [46] SUTTONJ. Technology and Market Structure [M]. Cambridge: MIT Press, 1991.

Human Capital Expansion, Industrial Robots, and the Quality of Enterprise Export Products

FANG Qiyun CHENG Ziang HU Yang

Abstract: This study utilizes micro-enterprise data in China from 2000 to 2013 and employs the expansion of college enrollment as a quasi-natural experiment for human capital expansion. It examines the synergistic effect of human capital expansion and the adoption of industrial robots on upgrading the export quality of enterprises. The findings are as follow: overall, the expansion of human capital and the introduction of industrial robots hold a positive synergistic effect, jointly promoting the quality of export products. The synergistic effect of human capital expansion and industrial robot adoption on improving export product quality varies across industries, financial situations, and regions. It mainly enhances the export product quality of labor-intensive and capital-intensive industries, also enterprises with low financial constraints, and enterprises in eastern regions. Mechanism testing reveals that the synergistic effect enhances export product quality through three main channels: the promotion effect on intermediate goods quality, the effect on research and development (R&D) activities, and the effect on productivity. From the perspective of resource reallocation, the study decomposes the export product quality in industry level and finds that the synergistic effect promotes the overall export product quality of the industry through resource reallocation.

Keywords: Expansion of College Enrollment; Industrial Robots; Enterprise Export Quality

(责任编辑 王 瀛)