

第二章 人工智能促进出口 高质量发展的理论框架

为了考察人工智能对中国出口高质量发展的影响及其作用机制，本章首先从理论上厘清三大问题：第一，人工智能促进出口高质量发展的微观基础和力量载体在于出口企业，出口企业加快采用人工智能的根本原因和现实原因何在；第二，出口高质量发展是一个含义非常宽泛的概念，具体到中国出口企业而言，出口高质量发展可以体现在哪些具体维度；第三，人工智能促进出口高质量发展的作用机理是什么？

第一节 出口企业应用人工智能的原因剖析

出口企业是否应用人工智能技术，是讨论人工智能促进出口高质量发展的必要前提。那么接踵而至的问题在于，出口企业应用人工智能技术的原因何在？为了回答这一问题，这里基于 Melitz（2003）的异质性企业生产决策模型，将 Acemoglu 和 Restrepo（2019）、Bonfiglioli et al.（2020）的任务模型内嵌其中，从理论上厘清企业应用人工智能的根本原因，并基于中国特有国情，从劳动力因素和产业政策因素讨论了企业加快人工智能应用的现实原因。

一、基于利润最大化的根本原因

根据 Melitz（2003）的异质性企业决策模型，假设代表性消费者具有如下 CES 偏好：

$$U = \left[\int_{\omega \in \Omega} q(\omega)^\rho d\omega \right]^{\frac{1}{\rho}} \quad (2-1)$$

其中： Ω 为一系列产品集； $q(\omega)$ 为消费者对产品 ω 的消费量； ρ 表示消费者对产品多样性的偏好程度， $\rho \in [0, 1]$ ； σ 为产品之间的替代弹性， $\sigma = 1/1 - \rho > 1$ 。假设消费者消费的产品集等于生产的总产品，即 $Q = U$ ，则求解消费者效用最大化问题，可以得到每种产品的最优消费为

$$q(\omega) = Q \left[\frac{p(\omega)}{P} \right]^{-\sigma} \quad (2-2)$$

其中：价格指数 $P = \left[\int_{\omega \in \Omega} p(\omega)^{1-\sigma} d\omega \right]^{\frac{1}{1-\sigma}}$ 。

本书从任务角度考察企业的生产方式，假设企业可以使用劳动力 (L) 和工业机器人 (K) 进行生产。在本章中，我们以工业机器人表征人工智能技术。工业机器人可以完成由劳动力完成的任务，故从广义上讲，工业机器人作为另类劳动力要素参与生产。设 φ 为外资企业的生产率， r 和 w 分别表示工业机器人的价格和工资， $r < w$ ，故机器化可以降低成本并提高生产效率，应用工业机器人有利可图。

假设企业的生产过程由一系列任务 x 组成，将其标准化至区间 $[0,1]$ ，即 $x \in [0,1]$ 。这些任务包含可自动化和不可自动化两类，前者可以应用工业机器人和劳动完成生产，后者只能通过劳动力生产。任务 $x \in [0, \alpha]$ 可以实现技术自动化，而其余任务不能自动化。本书设定任务 x 的要素投入为 $x(z)$ ，则企业的生产函数为

$$q = \varphi \exp\left(\int_0^1 \ln x(z) dz\right) \quad (2-3)$$

在上述的假设下，当 $x \in [0, \alpha]$ 时，工业机器人具有生产的比较优势，企业会倾向于应用工业机器人生产这部分任务。所以有：

$$x(z) = \begin{cases} K / \alpha, & \text{if } x \in [0, \alpha] \\ L / (1 - \alpha), & \text{if } x \in [\alpha, 1] \end{cases} \quad (2-4)$$

由式 (2-3) 和式 (2-4) 可以推得企业的生产函数为

$$q = \varphi \left(\frac{K}{\alpha}\right)^\alpha \left(\frac{L}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha} \quad (2-5)$$

所以企业在生产时满足：

$$\max_{K,L} \{pq - rK - wL\} \quad (2-6)$$

结合式 (2-2) 和式 (2-5)，可知利润最大的一阶条件为

$$wL = \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)(1 - \alpha)pq \quad (2-7)$$

$$rK = \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)\alpha pq \quad (2-8)$$

所以有：

$$K = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\left(\frac{w}{r}\right)L \quad (2-9)$$

将式 (2-9) 代入式 (2-5)，生产函数转变为

$$q = \varphi \left(\frac{L}{1-\alpha}\right)\left(\frac{w}{r}\right)^\alpha \quad (2-10)$$

此时, 企业的利润为

$$\begin{aligned} \pi &= pq - rK - wL = q^{\frac{1}{\sigma}} Q^{\frac{1}{\sigma}} P - r \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \left(\frac{w}{r} \right) L - wL \\ &= \left[\varphi \left(\frac{L}{1-\alpha} \right) \left(\frac{w}{r} \right)^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\sigma}} Q^{\frac{1}{\sigma}} P - \left(\frac{1}{1-\alpha} \right) wL \end{aligned} \quad (2-11)$$

将式 (2-11) 对可自动化任务的比例 α 求导, 可得:

$$\frac{\partial \pi}{\partial \alpha} = \left(1 - \frac{1}{\sigma} \right) q^{\frac{1}{\sigma}} Q^{\frac{1}{\sigma}} P \varphi \left[\frac{L}{(1-\alpha)^2} \left(\frac{w}{r} \right)^{\alpha} + \frac{L}{1-\alpha} \left(\frac{w}{r} \right)^{\alpha} \ln \left(\frac{w}{r} \right) \right] + \frac{wL}{(1-\alpha)^2} > 0 \quad (2-12)$$

式 (2-12) 表明, 随着应用工业机器人的增加, 企业所获得的利润也会增加, 因此企业 (包括出口企业) 有应用工业机器人的根本性动力。

二、基于劳动力市场的现实原因

从现实经济生活来看, 中国出口企业对人工智能的应用除了主动寻求利润最大化的根本原因, 还有“被动”的原因, 且这一原因与出口企业面临的劳动力市场变化有关。

正如第一章所指出的, 改革开放以来, 中国之所以能在出口贸易方面交出一份“令人满意的答卷”, 其原因之一是中国凭借低廉的成本优势, 显著提升了“中国制造”在全球经济格局中的影响力。然而, 近年来人口老龄化趋势日益明显, 人口红利逐渐消失, 低成本优势不再 (陆旸, 蔡昉, 2016)。国家统计局数据表明, 2000—2019 年中国城市平均工资上升了近 9 倍, 其中最低工资标准的不断调整是工资上涨极为重要的因素之一。一方面, 最低工资政策是政府保障劳动者权益、促进社会公平的重要手段; 但是另一方面, 最低工资上调会增加企业用工成本、压缩企业利润空间, 导致制造业的成本竞争优势逐渐削弱, 不仅给出口企业带来了严峻挑战, 而且成为阻碍中国出口高质量发展的“瓶颈”。

为了从理论上推导工业机器人的应用是否能够对此“瓶颈”有所缓解, 本书将式 (2-10) 代入式 (2-7), 可以得到劳动力需求函数

$$L = w^{-\sigma} \left(1 - \frac{1}{\sigma} \right)^{\sigma} \varphi^{\sigma-1} Q P^{\sigma} (1-\alpha) \left(\frac{w}{r} \right)^{\alpha(\sigma-1)} \quad (2-13)$$

式 (2-13) 中, L 对 α 求导得到:

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = B_2 \left[(\sigma-1)(1-\alpha) \ln \left(\frac{w}{r} \right) - 1 \right] \quad (2-14)$$

其中: $B_2 = w^{-\sigma} \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)^\sigma \varphi^{\sigma-1} Q P^\sigma \left(\frac{w}{r}\right)^{\alpha(\sigma-1)}$ 。若 $(\sigma-1)(1-\alpha) \ln\left(\frac{w}{r}\right) - 1 > 0$, $\frac{\partial L}{\partial \alpha} > 0$, 此时企业应用工业机器人会增加对劳动力的需求, 即创造效应占据主导地位; 反之, 若 $(\sigma-1)(1-\alpha) \ln\left(\frac{w}{r}\right) - 1 < 0$, $\frac{\partial L}{\partial \alpha} < 0$, 企业应用工业机器人会替代劳动力, 替代效应占据主导地位。

根据式 (2-7)、式 (2-10) 和式 (2-11) 可知 $\frac{\partial \pi}{\partial L} > 0$, 又因为 $\frac{\partial \pi}{\partial \alpha} = \frac{\partial \pi}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial \alpha} > 0$, 故有 $\frac{\partial L}{\partial \alpha} > 0$, 这说明在生产过程中, 工业机器人更多地发挥创造效应, 而不是替代效应。已有文献已经表明, 随着工业机器人的使用, 创造效应更多地体现为对高技能劳动力和知识型人才等非生产性工人的需求增加 (Meltzer, 2018; Bonfiglioli et al., 2020)。进一步, 本书参照 Bonfiglioli et al. (2020)、何小钢等 (2023) 的处理, 将应用工业机器人创造的非生产性工人考虑进模型, 假设非生产性工人的成本为

$$hf(\alpha) = \frac{h\alpha^\beta}{\gamma\beta} \quad (2-15)$$

其中: $\beta > 1$ 表明成本为凸性; γ 反映了企业生产过程中任务的可替代性指数。式 (2-15) 结合式 (2-7)、式 (2-10)、式 (2-11) 和式 (2-13) 消除 L , 可得到生产函数、利润函数和 π 对 α 的一阶条件如下:

$$q = \varphi^\sigma w^{-\sigma} Q P^\sigma \left(\frac{w}{r}\right)^{\alpha\sigma} \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)^\sigma \quad (2-16)$$

$$\pi = \frac{1}{\sigma} pq - hf(\alpha) = \frac{1}{\sigma} q^{1-\frac{1}{\sigma}} Q^{\frac{1}{\sigma}} P - \frac{h\alpha^\beta}{\gamma\beta} \quad (2-17)$$

$$\left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) pq \ln\left(\frac{w}{r}\right) = \frac{h\alpha^{\beta-1}}{\gamma} \quad (2-18)$$

因此, 劳动收入份额为

$$LS = \frac{wL + hf}{pq} = \underbrace{\left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)(1-\alpha)}_{\text{替代效应带来的收入份额减少}} + \underbrace{\left(1 - \frac{1}{\sigma}\right)\alpha\beta^{-1} \ln\left(\frac{w}{r}\right)}_{\text{创造效应带来的收入份额增加}} \quad (2-19)$$

在生产过程中, 工业机器人的创造效应占据更重要的地位, 进一步根据式 (2-19) 和式 (2-10) 推知, 创造效应还会对企业劳动力收入和人均产出带来促进作用。

由此可见, 最低工资的不断上调, 有可能“倒逼”出口企业应用更多的

人工智能（如工业机器人）。应用人工智能后，一方面，劳动力的工资水平并未下降，能够吸引更多的劳动力（特别是高技能劳动力和知识型人才）加入，在一定程度上有助于解决“用工荒”的问题；另一方面，人均产出的增加抵消了劳动力成本的上升，企业生产更具效率，更有可能实现企业利润最大化。在本章从理论层面提出这一命题的基础上，本书第三章还将从实证视角给出详细的答案。

三、基于产业政策的现实原因

2017年之前，中国对人工智能的产业支持政策尚处于初期探索阶段，这一阶段出台的政策主要包括《国务院关于推进物联网有序健康发展的指导意见》《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》和《国务院关于印发促进大数据发展行动纲要的通知》。换言之，这一阶段的产业政策主要偏向于物联网和“互联网+”，并未专门针对人工智能的应用与落地。

为了系统指导各地方和各企业主体加快人工智能场景应用，推动经济高质量发展，中央与各地方政府在2017年之后出台了一系列鼓励性的产业政策，包括《新一代人工智能发展规划》《关于促进人工智能和实体经济深度融合的指导意见》《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划（2018—2020年）》《关于“双一流”建设高校促进学科融合 加快人工智能领域研究生培养的若干意见》《新一代人工智能治理原则——发展负责任的人工智能》等政策，对人工智能的应用进入了加速推进的阶段。

2020年至今，国家进一步出台了《关于加快场景创新 以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》和《关于支持建设新一代人工智能示范应用场景的通知》等一系列政策。据统计，2020年1月1日至2023年6月14日，中央与地方政府一共出台了70部数字经济相关政策，其中中央17部，地方政府53部。这些人工智能政策主要针对产业链行业应用层，^①产业政策鼓励人工智能应用落地的特点在这一阶段十分鲜明。从这个角度上讲，包括出口企业在内的中国企业之所以不断加大人工智能的应用力度，也和支持人工智能应用层发展的产业政策息息相关。^②

① 零壹智库. 70部人工智能政策解读：产业侧重和方向差异[EB/OL]. (2023-07-26) [2023-10-08]. <http://news.qq.com/rain/a/20230726A05FCJ00>.

② 需要说明的是，本书主要聚焦中国出口企业，采用的数据以中国工业企业数据库（2000—2015年）和中国海关数据库（2000—2016年）的匹配数据为主。因此，在本书的样本期里，鼓励人工智能应用的产业政策相对较少，因此在实证部分中，重点仅考虑劳动力市场的变化，而没有进一步检验产业政策的作用。

第二节 出口高质量发展的具体内涵

出口高质量发展是一个内涵十分丰富、涵盖多个维度的概念。迄今为止，学者们从不同的视角出发，对其作出了各不相同的内涵与外延界定。例如，魏方等（2021）认为出口产品质量指标是出口高质量发展的重要指征，能综合反映国内供给侧对创造与开发能力和国际需求侧对产品的认可及满足程度；魏浩和王超男（2023）则将出口稳定和出口产品质量升级两个维度作为出口高质量发展的内容。

与已有研究相比，本书界定的出口高质量发展指标更为丰富，其选取依据来自2019年11月中共中央、国务院正式批准发布的《指导意见》和2021年3月第十三届全国人民代表大会第四次会议通过的“十四五”规划，以期全面彰显中国出口高质量发展的内涵。其中，《指导意见》第二条明确提出“加快创新驱动，培育贸易竞争新优势”，而且贸易新优势的来源在于“推动互联网、物联网、大数据、人工智能、区块链与贸易有机融合，加快培育新动能”。由此可见，人工智能与贸易的有机融合，有可能成为出口高质量发展的重要推动力。

具体到出口高质量发展的指标选择，《指导意见》和“十四五”规划均给出了相关表述。

（1）“十四五”规划明确指出，中国要进一步“扩大贸易规模，稳定国际市场份额”，即中国企业如何实现出口规模的稳步增长和培育贸易竞争新优势，是中国出口高质量发展的重要基础。这也意味着，中国出口高质量发展是以一定出口规模为基础的，没有不断增长的出口规模作为基础，中国难言贸易高质量发展。基于此，“出口规模增长”成为本书选取的第一个维度。

（2）《指导意见》第二条明确提出“提高产品质量，推动一批重点行业产品质量整体达到国际先进水平”。事实上，出口产品质量一直是国际贸易领域的热点问题，也是中国出口贸易高质量发展的直接体现。以工业机器人为代表的人工智能技术，能否打破中国长期以来的低价低质困境、提升出口产品质量，对中国出口高质量发展的意义不言而喻。基于此，本书选取的第二个维度是“出口产品质量”，和魏方等（2021）、魏浩和王超男（2023）的研究保持一致。

(3)《指导意见》第三条提出的“做强一般贸易”“提升加工贸易”“鼓励向产业链两端延伸”，均与出口产品范围有关。由于多产品企业在中国对外贸易中扮演了举足轻重的角色，贡献了中国全部出口额的绝大部分，因此依然是中国出口高质量发展的主力军。面对人工智能为出口高质量发展带来的各种机遇，多产品企业如何对产品范围作出调整，既是企业内部资源再分配的重要形式，也是企业出口增长的重要源泉。基于此，本书选取的第三个维度是“出口产品范围”。

(4)《指导意见》第三条在提出“优化贸易结构，提高贸易发展质量和效益”的同时，还专门强调了“大力发展高质量、高技术、高附加值产品贸易”，“加快推动智能制造发展，逐步从加工制造环节向研发设计、营销服务、品牌经营等环节攀升，稳步提高出口附加值”。由于中国出口企业在全球价值链中的分工位置不仅影响一国在贸易中的获利能力，更能决定该国对全球价值链的控制程度与“经济话语权”，因此，在当前中国“双循环”格局的构建过程中，提升出口企业在全价值链中的位置，特别是提升出口的国内附加值率，成为保障国际循环贸易利得、国内循环顺利进行的首要前提，也成为中国出口高质量发展的重要组成部分。正因如此，本书选取的第四个维度是“出口贸易利得”，即“出口国内附加值”。

(5)《指导意见》第四条明确提出“推动贸易可持续发展”，即“发展绿色贸易，严格控制高污染、高耗能产品进出口”。为此，本书选取的第五个维度是“出口企业绿色减排”，专门考察人工智能对中国出口企业绿色减排的影响，强调“可持续发展”构成了中国出口高质量发展的重要一环。

图 2-1 展示了本书出口高质量发展的维度及其相应指标，为后文的实证检验提供了理论依据。在此基础上，本书以上述五个维度作为一级指标，进一步测算中国企业出口高质量发展综合指数，旨在对人工智能促进中国出口高质量发展作出总体判断。值得注意的是，尽管人工智能有可能增加出口规模、提升出口产品质量，扩容出口产品范围，获取更多贸易利得，实现可持续发展，最终实现出口高质量发展。但是，这些作用的发挥绝不是“单打独斗”所能完成的，而是需要依赖于一系列硬件和软件配套，因此本书有必要专门考虑硬件配套、软件配套、技术配套和人员配套等，为人工智能促进出口高质量发展保驾护航。

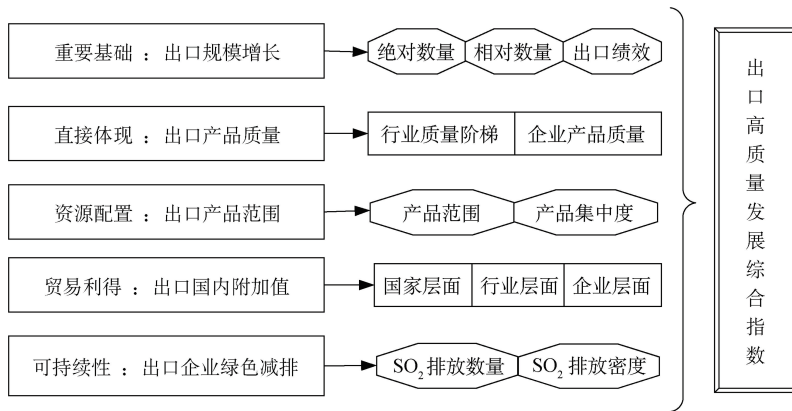


图 2-1 出口高质量指标的内涵

第三节 人工智能影响出口高质量发展的作用机制

为了诠释人工智能影响出口高质量发展的作用机制，本节以 Helpman et al. (2004) 的理论为框架，在 Acemoglu 和 Restrepo (2020)、Fan et al. (2020) 模型的基础上，将人工智能在生产中的最常用技术——工业机器人考虑在内，构建了一个更具一般性的出口企业模型，从理论上诠释了工业机器人的应用对出口高质量发展的影响机制。

一、基本模型假设

假设国外市场存在代表性消费者，其对差异化产品的偏好体现为 CES 效用函数：

$$U = \left[\int_{\omega \in \Omega} q(\omega)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} d\omega \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (2-20)$$

其中： $\sigma > 1$ 为不同产品间的替代弹性； Ω 为一系列产品集； $q(\omega)$ 为消费者对产品 ω 的消费量。

国外消费者的总支出为

$$E = \int_{\omega \in \Omega} p(\omega)q(\omega)d\omega \quad (2-21)$$

通过求解消费者效用最大化问题，可得消费者对产品 ω 的需求函数：

$$q(\omega) = p(\omega)^{-\sigma} P^{\sigma-1} E \quad (2-22)$$

其中： $p(\omega)$ 为产品 ω 的价格； P 为国外市场的价格指数，具体表示为

$$P = \left[\int_{\omega \in \Omega} p(\omega)^{1-\sigma} d\omega \right]^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (2-23)$$

在垄断竞争条件下，企业使用劳动力和机器人来生产差异化产品。根据 Acemoglu 和 Restrepo (2020) 的多任务模型，具有生产率 φ 的企业其生产函数可表示为

$$Y(\varphi) = \varphi \min_{s \in [0,1]} (l(s) + \eta(s)r(s)) \quad (2-24)$$

其中： $l(s)$ 和 $r(s)$ 分别表示在生产任务 s 中劳动力和机器人的投入数量； $\eta(s)$ 为劳动力与机器人的相对生产率，且机器人的比较优势在不同任务间有所差异。假设 $\eta(s)$ 是连续可微且严格递减的函数，因此存在临界值 s^* 使得 $\eta(s^*) = \frac{R_{robot}}{w}$ ，当 $s < s^*$ 时用机器人生产，生产的边际成本为 $\frac{R_{robot}}{\eta(s)\varphi}$ ；当 $s > s^*$ 时用劳动力生产，生产的边际成本为 $\frac{w}{\varphi}$ 。其中， R_{robot} 为机器人的租金率， w

为工人的工资率，为简化分析，假设二者保持不变。

机器人投入生产，企业需要支付一定的固定成本。假设使用机器人的固定成本为 $f \cdot \xi$ ，其中 $\xi \in (0, +\infty)$ 是符合独立同分布、均值为 1 的随机变量。结合式 (2-23) 可得，企业使用机器人前后的出口利润分别为

$$\Pi_0(\varphi) = E \cdot \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\sigma}{\sigma-1} \frac{w}{\varphi} \right)^{1-\sigma} P^{\sigma-1} \quad (2-25)$$

$$\Pi_r(\varphi) = E \cdot \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\sigma}{\sigma-1} \left(\int_0^{s^*} \frac{R_{robot}}{\eta(s) \cdot \varphi} ds + \frac{(1-s^*)w}{\varphi} \right) \right]^{1-\sigma} P^{\sigma-1} - f\xi \quad (2-26)$$

当且仅当企业使用机器人后的出口利润大于未使用机器人时，企业才会选择使用机器人。因此，假设企业生产率已满足该条件，则企业使用机器人后的出口收益函数为

$$R = p(\omega)q(\omega) = E \cdot \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\sigma}{\sigma-1} \left(\int_0^{s^*} \frac{R_{robot}}{\eta(s) \cdot \varphi} ds + \frac{(1-s^*)w}{\varphi} \right) \right]^{1-\sigma} P^{\sigma-1} \quad (2-27)$$

二、作用机制推导

令 $\int_0^{s^*} \frac{R_{robot}}{\eta(s) \cdot \varphi} ds + \frac{(1-s^*)w}{\varphi} = C$ 为企业边际成本，为判断出口收益函数与生产率和边际成本之间的关系，将式 (2-24) 分别对生产率和边际成本求一阶导数：

$$\frac{\partial R}{\partial \varphi} = E \cdot \left[\int_0^{s^*} \frac{R_{robot}}{\eta} + (1-s^*)w \right]^{1-\sigma} \left(\frac{\sigma-1}{\sigma} \right)^\sigma \varphi^{\sigma-2} P^{\sigma-1} > 0 \quad (2-28)$$

$$\frac{\partial R}{\partial C} = -E \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma-1} C \right)^{-\sigma} P^{\sigma-1} < 0 \quad (2-29)$$

在满足 $\sigma > 1$ 的前提下，出口收益与生产率成正比，与边际成本成反比。根据 Acemoglu 和 Restrepo (2019) 的分析，工业机器人提高了出口企业的生产率，降低了出口企业的生产成本。基于此，可以判断工业机器人应用能够通过提高生产率机制和降低生产成本机制来改善企业出口规模。

在考察出口规模的基础上，本节参照 Khandelwal (2013)、Martin 和 Mejean (2014) 的做法，在 Melitz (2003) 的异质性企业理论框架下引入产品质量，将出口收益进一步与产品质量挂钩。在此情况下，讨论了企业所面临的出口决策。企业面临的由出口产品质量表示的需求函数为

$$q(\omega) = \lambda(\omega)^{\sigma-1} \frac{p(\omega)^{-\sigma}}{P^{1-\sigma}} E \quad (2-30)$$

其中： ω 代表每一种差异化产品； $\lambda(\omega)$ 、 $p(\omega)$ 和 $q(\omega)$ 分别代表产品的质量、价格和需求量； E 为目的国总支出，替代弹性 $\sigma > 1$ 。若企业出口某产品时可以通过选择不同的质量和价格组合，来达到出口利润最大化，则企业将产品出口至某国的利润函数为

$$\Pi = \left(p(\omega) - \frac{c(\omega)\lambda(\omega)^\delta}{\varphi} \right) \lambda(\omega)^{\sigma-1} \frac{p^{-\sigma}}{P^{1-\sigma}} E - f(\omega)\lambda(\omega)^\eta \quad (2-31)$$

其中，不同企业在生产质量为标准质量的同类产品时，平均边际成本为常数 $c(\omega)$ ， φ 代表企业的全要素生产率。则 $c(\omega)\lambda(\omega)^\delta / \varphi$ 表示经质量和生产率调整后的边际成本，与产品质量成正比，与生产率成反比， $\delta > 0$ 代表边际成本对产品质量的弹性； $f(\omega)$ 代表设备、研发等基本投入，经质量调整后表示为 $f(\omega)\lambda(\omega)^\eta$ ，与产品质量成正比， $\eta > 0$ 代表出口成本对产品质量的弹性。

求解式 (2-31) 最大化一阶条件，其中价格条件为

$$p(\omega) = \frac{\sigma}{\sigma-1} \frac{c(\omega)}{\varphi} \lambda(\omega)^\delta \quad (2-32)$$

将 (2-32) 式带回式 (2-30) 可得：

$$q(\omega) = \lambda(\omega)^{\sigma-1-\sigma\delta} \left(\frac{\sigma}{\sigma-1} \frac{c(\omega)}{\varphi} \right)^{-\sigma} \frac{E}{P_0^{1-\sigma}} \quad (2-33)$$

为保证需求的质量弹性为正，需满足 $\delta < (\sigma-1)/\sigma$ ，由于 $\sigma > 1$ ，故有 $\delta \in (0,1)$ 。将式 (2-32) 代入式 (2-31) 后，出口净收益部分 $\lambda(\omega)$ 的次数为 $(\sigma-1)(1-\delta)$ ，为保证利润函数不发散，需进一步满足出口成本部分 $\lambda(\omega)$ 的次数 $\eta > (\sigma-1)(1-\delta)$ ，否则企业所选质量将趋向于无穷，无最优解。这一结果的含义为，随着质量的不断提升，设备和研发投入的增幅将逐渐超过收益的增幅。此时求解利润最大化的质量条件，可得：

$$\lambda(\omega)^{\eta-(\sigma-1)(1-\delta)} = \frac{(1-\delta)Y}{f(\omega)\eta P_0^{1-\sigma}} \left(\frac{\sigma-1}{\sigma} \right)^\sigma \left(\frac{\varphi}{c(\omega)} \right)^{\sigma-1} \quad (2-34)$$

在满足 $\delta \in (0,1)$ ， $\eta > (\sigma-1)(1-\delta)$ 的前提下，出口产品质量与生产率 φ 成正比，与经生产率调整的边际成本 $c(\omega)/\varphi$ 成反比。根据前文的讨论，我们可以判断出口企业使用机器人通过提高生产率机制和降低边际成本机制，可以提升企业出口产品质量，也有助于实现出口高质量发展。

考虑到出口贸易利得也是出口高质量发展的重要表征，本节在 Kee 和 Tang (2016) 研究的基础上，借鉴 Acemoglu 和 Restrepo (2019)、Blanas et al. (2019) 的任务生产函数思想，将工业机器人引入国内中间品的生产，讨论了垄断竞争市场条件下企业使用工业机器人对出口国内附加值的影响。

参考 Kee 和 Tang (2016) 的做法，将企业生产函数设定为

$$Q = \varphi K^\alpha L^\beta M^\gamma, \quad M = \left(M_{dom}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} + M_{imp}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (2-35)$$

其中： Q 为企业产出； φ 为全要素生产率； K 、 L 和 M 分别为资本、劳动和中间品，所占份额分别为 α 、 β 、 γ 。中间品分为国内中间品 M_{dom} 和进口中间品 M_{imp} ， $\varepsilon > 1$ 为二者的替代弹性。若以 r 、 w 、 P_M 分别表示资本、劳动、中间品要素的价格水平，经过成本最小化后，企业的边际成本表达式可写作：

$$c = \frac{1}{\varphi} \left(\frac{r}{\alpha} \right)^\alpha \left(\frac{w}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{P_M}{\gamma} \right)^\gamma, \quad P_M = \left(P_{dom}^{1-\varepsilon} + P_{imp}^{1-\varepsilon} \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (2-36)$$

其中： P_M 代表各种中间品的价格指数，由本国中间品价格指数 P_{dom} 和进口中间品价格指数 P_{imp} 构成。在此基础上，本章将工业机器人引入国内中间品的生产过程，并参照 Acemoglu 和 Restrepo (2019)、Blanas et al. (2019) 的任务生产函数的思想，假定 M_{dom} 的生产过程由一系列复杂程度不同的任务组成， M_{dom} 的生产函数如式 (2-37) 所示， ρ 为不同任务间的替代弹性。任务的复杂程度越低，越适合以自动化的方式完成。企业使用不同比例的自动化和非自动化要素完成不同的任务，根据 Acemoglu 和 Restrepo (2019)、Blanas et al. (2019) 的做法，将任务的生产简化为完全替代形式。复杂程度低于 s^* 的任务，以自动化的方式完成，使用要素 k 生产，份额为 κ ；复杂程度高于 s^* 的任务，以非自动化方式完成使用要素 l 生产，份额为 $1-\kappa$ 。企业可通过选择临界任务 s^* 来改变成本，这等同于调整自动化生产份额 κ 。

$$M_{dom} = \left(\kappa^\rho k^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-\kappa)^\rho l^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (2-37)$$

若以 P 代表企业产成品价格, 根据 Kee 和 Tang (2016), 将出口国内附加值 ($DVAR$) 表示为 1 减去进口中间品占企业产出之比, 并进行如下恒等变形:

$$\begin{aligned} DVAR &= 1 - \frac{P_{imp}M_{imp}}{PQ} = 1 - \frac{P_{imp}M_{imp}}{P_M M} \times \frac{P_M M}{cQ} \times \frac{cQ}{PQ} \\ &= 1 - \gamma \times \frac{P_{imp}M_{imp}}{P_M M} \times \frac{c}{P} \end{aligned} \quad (2-38)$$

其中: $P_{imp}M_{imp} / P_M M$ 表示进口中间品占中间投入的比例, 在将中间品成本最小化后, 对中间品生产自动化份额 κ 求导, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(P_{imp}M_{imp} / P_M M)}{\partial \kappa} &= \frac{\partial(P_{imp}M_{imp} / P_M M)}{\partial P_{dom}} \frac{\partial P_{dom}}{\partial \kappa} \\ &= \frac{(\varepsilon - 1)P_{dom}^{\rho + \varepsilon - 2} P_{imp}^{\varepsilon - 1}}{\theta^{\sigma - 1} (1 - \sigma) (P_{dom}^{\varepsilon - 1} + P_{imp}^{\varepsilon - 1})^2} (w_k^{1 - \rho} - w_l^{1 - \rho}) \end{aligned} \quad (2-39)$$

式中, θ 代表国内中间品的加成率。企业为实现成本最小化, 需满足以自动化方式完成临界任务 s^* 所支付的租金 w_k , 与以非自动化方式完成临界任务 s^* 所支付的工资 w_l 完全相同, 此时, 式 (2-39) 的取值为 0, 企业亦没有改变中间品生产过程中自动化比例的动机; 但是当工业机器人的相对价格降低 (如工业机器人价格降低、最低工资提升等) 时, 以自动化方式完成原临界任务 s^* 所支付的租金 w_k 将低于 w_l , 对任意 $\rho > 0$, 式 (2-39) 取值均为负, 表明若此时提升本国中间品生产过程中的自动化份额, 可降低本国的中间品价格, 从而将一些由外国完成的中间品吸引或回流至本国 (Jäger et al., 2015; Faber, 2020; Kugler et al., 2020; Krenz et al., 2021), 同时促使企业使用相对价格更低的本国中间品替代进口中间品 (诸竹君等, 2018; 毛其淋, 许家云, 2019; 闫志俊, 于津平, 2019), 即 $(\partial(P_{imp}M_{imp} / P_M M) / \partial \kappa) < 0$ 。

进一步结合式 (2-38), 可知:

$$\left(\frac{\partial DVAR}{\partial (P_{imp}M_{imp} / P_M M)} \right) \left(\frac{\partial (P_{imp}M_{imp} / P_M M)}{\partial \kappa} \right) > 0 \quad (2-40)$$

由此可见, 工业机器人应用可以促进企业使用本国中间品替代进口中间品, 降低进口中间品占比, 有利于出口 $DVAR$ 的提升。

式 (2-38) 中的 c/P 为企业成本加成的倒数, 企业的成本加成受行业层面中间品和产成品供求的影响, 但行业内工业机器人的应用可能会影响行业的整体产出和对中间品的需求, 故其与自动化份额间的关系难以直观判断。为了分析工业机器人对企业成本加成的影响, 本节假定市场为垄断竞争市

场,则均衡的市场价格与企业边际成本之间的关系可表示为式(2-41)。其中, $|\tau| > 1$ 表示产品需求弹性的绝对值, Q_{-1} 代表行业内其他企业的产量,将其代入式(2-40)并化简,可得式(2-42)。

$$P = \frac{c \cdot (Q + Q_{-1}) |\tau|}{(Q + Q_{-1}) |\tau| - Q} \quad (2-41)$$

$$DVAR = 1 - \gamma \times \frac{P_{imp} M_{imp}}{P_M M} \times \frac{c}{P} = 1 - \gamma \times \frac{P_{imp} M_{imp}}{P_M M} \times \left(1 - \frac{Q}{|\tau|(Q + Q_{-1})} \right) \quad (2-42)$$

经过化简,成本加成效应表示为式(2-42)最右侧括号中的因子,由企业自身和行业内其他企业的产出共同决定。根据式(2-35)和式(2-37),将企业产出对自动化占比求导,可得:

$$\frac{\partial Q}{\partial \kappa} = \frac{\gamma}{\sigma - 1} Q \left(M_{dom}^{\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}} + M_{imp}^{\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}} \right)^{-1} M_{dom}^{\frac{1 - \rho}{\rho} \varepsilon} \kappa^{\frac{1 - \rho}{\rho}} k^{\frac{\rho - 1}{\rho}} \left(1 - \left(\frac{w_k}{w_l} \right)^{\rho - 1} \right) \quad (2-43)$$

当工业机器人价格 w_k 降低,打破原有均衡时,式(2-43)取值为正,即 $\partial Q / \partial \kappa > 0$ 。同理,若以 κ_{-1} 表示其他企业的中间品自动化比例,则此时亦有 $\partial Q_{-1} / \partial \kappa_{-1} > 0$ 。根据式(2-42),可知 $\partial DVAR / \partial Q > 0$, $\partial DVAR / \partial Q_{-1} < 0$,故有:

$$(\partial DVAR / \partial (c / P)) (\partial (c / P) / \partial Q) (\partial Q / \partial \kappa) > 0 \quad (2-44)$$

$$(\partial DVAR / \partial (c / P)) (\partial (c / P) / \partial Q_{-1}) (\partial Q_{-1} / \partial \kappa_{-1}) < 0 \quad (2-45)$$

结合式(2-41)~式(2-45),可以看出出口企业应用工业机器人能够提高企业的成本加成,有利于出口国内附加值的提升,促进出口高质量发展。

值得一提的是,尽管以工业机器人为代表的人工智能应用,可以通过生产率提升机制、成本降低机制和中间品进口机制,对出口高质量发展产生促进作用。但是由于出口高质量发展的内涵十分丰富,本书选取的指标也比较多维,因此人工智能的作用机制不止上述三种,本书在涉及出口高质量发展的具体维度时,还会根据不同的维度选取更多的机制变量。

第四节 本章小结

本章构建了全书的理论分析框架,尝试回答了三个问题:第一,出口企业是人工智能促进出口高质量发展的微观基础和力量载体,之所以在生产中加快人工智能的应用,是因为使用人工智能后,企业的利润会得以增加,有助于实现利润最大化的目标;同时,结合中国的现实国情,劳动力市场的变化和产业政策的鼓励,也是出口企业应用人工智能的现实原因。第二,本书依据《指导意见》和“十四五”规划,将出口高质量发展的内涵扩容到增加

出口规模、提升出口产品质量，扩容出口产品范围，获取更多出口贸易利得，实现可持续发展五个维度，并在此基础上构建出口高质量发展指数。第三，通过构建和推导数理模型，本书还提出人工智能促进出口高质量发展的主要作用机制在于生产率提升机制、成本降低机制和中间品进口机制。但是，由于出口高质量发展的指标比较丰富，因此以下各章还需要根据不同的指标维度，选取更多更适宜的机制变量。