

工业自动化、收入差距与劳动力跨区域 流动的一般均衡模型

周大勇 杨 光*

摘 要:为解释工业自动化所引起的劳动力市场扭曲与地区间发展分化,本文构建了一个包含机器人使用与劳动力流动的动态随机一般均衡模型。研究结果表明:在短期,工业自动化一方面通过岗位替代效应破坏传统岗位,降低劳动使用量,另一方面通过生产率提升创造新的就业机会,从而引发劳动力市场扭曲。地区间自动化的不平衡发展引发地区分工变化,加剧了地区间收入差距的扩大,并推动劳动力向自动化水平较高地区聚集。

关键词:工业自动化;收入差距;劳动力流动

DOI: 10.13821/j.cnki.ceq.2026.04.03

一、引 言

人口的空间配置通常紧随经济活动的空间布局而变化^①,技术水平作为经济活动的重要方面,始终是重塑劳动力空间分布的重要因素。自 18 世纪工业革命以来,从蒸汽机、电力到信息技术的每次重大突破,都引发劳动力向新兴产业集聚区的大规模迁移(国务院发展研究中心市场经济研究所课题组等,2022)。这种流动呈现出鲜明的马太效应,中国改革开放后三大城市群的崛起与东北老工业基地的衰退形成鲜明对照;同样,美国“铁锈带”的衰落与东西海岸科技走廊的繁荣也构成鲜明对比。这些案例印证了技术创新是决定劳动力就业的区位抉择的关键因素。尽管中国的自动化技术发展已取得长足进步,但是其地区间发展水平则呈现出非平衡的态势。2010—2022 年间,中国工业机器人安装总量持续上升,但是其在地区间的使用差距明显扩大,由此引发中国劳

* 周大勇、杨光,南开大学经济学院。通信作者及地址:杨光,天津市南开区卫津南路 94 号;300000;电话:022-23501837;E-mail: yangg@nankai.edu.cn。本文研究得到国家社会科学基金重大项目(19ZDA047)的资助。感谢匿名审稿人和期刊主编的宝贵意见,当然文责自负。

① 参见孙志燕,“从人口空间布局的演变看我国区域政策的调整”,人民论坛网, https://www.rmlt.com.cn/2016/1208/451110_2.shtml,访问时间:2025 年 3 月 10 日。

动力流动格局的结构性转变。^①当前,我国劳动年龄人口占比持续下滑,传统人口红利逐渐消退,区域间劳动力流动的资源配置因此正上升为影响经济增长的关键变量(蔡昉,2017)。从城市维度来看,2010—2020年间人口净流出城市数量从91个激增至135个,其中中小城市占比高达80%,这种趋势也会导致中小城市普遍面临劳动力外流与企业用工困境(江曼琦和卢星宇,2024)。基于《百城市公共就业服务机构市场供求状况分析报告》所提供的数据显示,2020年下半年新冠疫情得到有效控制后,西部地区劳动力供给增长率出现显著回落,而中东部地区则明显提升;相较于西部地区,中东部地区的劳动力需求的波动幅度较为稳定,体现出中东部地区劳动力需求的韧性;从劳动力市场紧度变化率来看,中东部地区市场紧度变化率高于西部地区,说明尽管劳动力流入,但东部仍面临劳动力紧缺的情况,表明当地劳动力市场扭曲程度上升^②(见图1)。

为何当下我国青年失业率居高不下的同时,东部企业却普遍面临劳动力短缺的问题?为何“招工难”现象同样出现在中西部地区^③?为了回答上述问题,本文基于Krause and Lubik(2007)的理论框架,构建了一个融合工业自动化与区域间劳动力流动特征的搜寻与匹配模型。该模型的核心特征在于:①家庭供给两种劳动:低技能劳动与高技能劳动,低技能劳动力市场存在劳动摩擦。家庭通过比较不同地区的工资水平,内生地选择最优地点以寻找工作机会。②低技能劳动与机器人之间存在替代关系,而高技能劳动则与机器人呈现出互补关系。③模型中存在两个地区,分别为地区1与地区2,每个地区存在一个代表性制造业企业,且地区1的自动化概率高于地区2。由于自动化概率由机器人生产率内生决定,因此地区1的机器人生产率也高于地区2。在既定机器人生产率水平下,两地区的企业能够通过最优化决策,分别选择机器人使用量与新开放岗位空缺量。

① 详情请见附录I.1。限于篇幅,附录未在正文列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

② 劳动力市场扭曲主要体现为两种类型:一是劳动力市场的资源错配,包括技能错配(McGuinness, 2006; Robst, 2007)、搜寻摩擦与信息不对称(Pissarides, 2000; Rogerson et al., 2005)等现象;二是劳动力市场外部扰动导致的扭曲,包括税收与补贴扭曲(Davis and Henrekson, 2005)、用工制度约束(Bertola et al., 2000)以及劳动力市场分割(Zhao, 1999)等情况。而本文后续所分析的劳动力市场扭曲主要指搜寻摩擦所引起的劳动力市场扭曲,即劳动力市场存在失业与岗位空缺并存的现象。

③ “国务院新闻办就2023年5月国民经济运行情况举行发布会”,中国政府网,https://www.gov.cn/lianbo/fabu/202306/content_6886554.htm,访问时间:2025年1月20日;李兵兵,“‘用工荒’‘就业难’矛盾再现,如何实现人岗‘双向奔赴’?”,https://mp.weixin.qq.com/s/JZ45H1_YHAc-gXk7Hlc8yQ,访问时间:2025年1月20日。

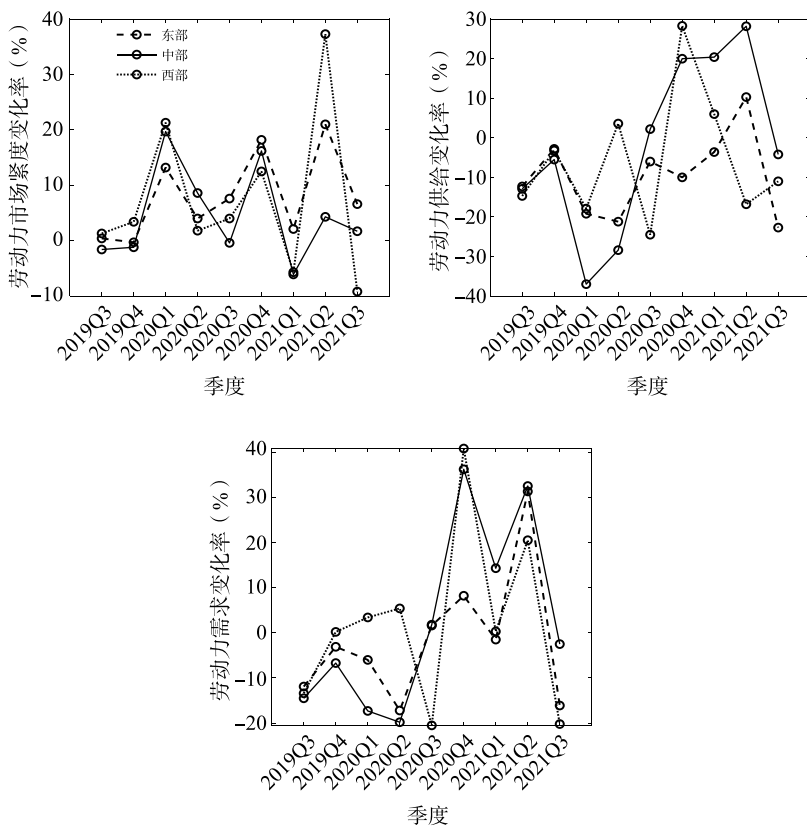


图1 2019—2021年中国三大地区劳动力市场变化情况

注:劳动力市场紧度变化率=劳动需求变化率-劳动供给变化率;劳动力供给变化率=(本期求职人数-上一期求职人数)/上一期求职人数 $\times 100\%$;劳动需求变化率=(本期岗位空缺-上一期岗位空缺)/上一期岗位空缺 $\times 100\%$ 。

数据来源:数据来自人力资源和社会保障部信息中心和中国就业培训技术指导中心对全国80个城市的公共就业服务机构市场供求信息的调查。

研究结果发现:地区1在机器人生产率提升后,该地区自动化概率上升,低生产率岗位被替代,就业下降,平均劳动生产率和低技能劳动力的平均工资水平提高,吸引了其他地区失业的低技能劳动力向其流动寻找工作。同时,高技能劳动力因与机器人互补,边际产出的上升带动了工资水平上升,就业规模也同步扩张。由此,地区1逐步形成以高自动化、机器人为代表的技术密集与高技能劳动密集为特点的发展模式。

与之对比,地区2则在技术扩散过程中表现出不同的特征。由于地区1工资水平提高,形成了显著的虹吸效应,促使地区2的低技能失业劳动力流向地区1。劳动力外流与本地自动化进程相对滞缓导致企业对自动化投资动力不足,机器人使用量下降,低技能劳动就业和劳动产出有所增长,形成以劳动密集生产为主的经济特征。同时,高技能劳动力的外流进一步推高了本地高技能劳

动力的工资水平,但就业规模难以扩张。最终,地区 2 在机器人普及率和自动化水平上逐步落后于地区 1,更多依赖于传统劳动密集型产业,地区间的分工格局由此逐步形成。

此外研究还发现,在考虑地区-行业差异后,地区间自动化技术的不平衡发展不仅引起了劳动力的区域再配置,也将劳动力从制造业“挤出”到非制造业。与此同时,区域间工业自动化的不平衡发展加剧了劳动力市场的扭曲程度,导致自动化程度较高地区面临岗位空缺数量提高与高失业同时存在的局面。落后地区可通过工业自动化升级,提高劳动生产率水平,吸引劳动力回流,促进区域协调发展。

本文在研究过程中,参考了大量的相关研究。关于工业自动化如何影响劳动力流动的问题,当前研究主要形成了三种解释:其一,部分文献认为工业自动化或者人工智能在使用过程中“替代效应”占主导,工业自动化进程会导致程序化、重复性的工作岗位被替代(Autor, 2015; Acemoglu and Restrepo, 2020; 王永钦和董雯,2023)。企业则由于自动化产生替代效应,降低了对劳动力的需求,减少了劳动力就业机会,劳动力的议价能力受自动化设备影响而降低,从而促使劳动力离开工业自动化水平较高的地区寻找工作(孔高文等,2020; 綦建红和付晶晶,2022; 曹章露等,2023; 屠年松等,2024)。也有研究认为工业自动化的发展没有将劳动力挤出到其他地区,而是挤出到了其他行业(陈媛媛等,2022; 綦建红和付晶晶,2022)。其二,部分文献则认为“生产率效应”占主导地位,工业自动化的发展并非挤出劳动力,反而促使劳动力流入。其背后逻辑在于机器人通过降低单位成本,从而激励企业增加对非自动化岗位劳动力的雇佣(Acemoglu and Restrepo, 2018a; Acemoglu and Restrepo, 2019; 陈媛媛等,2022; 王永钦和董雯,2023)。因此,生产率效应有望吸引劳动力流向工业自动化水平较高的地区(魏下海等,2020; 张君凯和张世伟,2024)。其三,工业机器人等自动化设备的使用对不同的劳动群体的迁移决策存在着差异性影响。有文献研究指出,工业机器人替代了大量低端劳动力进而提高了劳动生产率,从而使目前还有工作的人群工资水平提升(Acemoglu and Restrepo, 2019; 闫雪凌等 2020); 机器人也可与高技能劳动力形成互补,可使企业扩大对高技能劳动力的需求(Acemoglu and Restrepo, 2020; 黄卓等,2024),这种差异性影响导致低技能劳动者更容易由于工作岗位被机器所替代而选择外流(魏下海等,2020; 綦建红和付晶晶,2022; 曹章露等,2023; 屠年松等,2024),而技术进步带来的高薪和良好就业前景吸引了高技能劳动力的流入(王永钦和董雯,2023; 綦建红和付晶晶,2022; Bian and Zhou, 2024)。本文认为,以上研究的不足之处在于:现实中,由于供求双方信息不对称,劳动力市场中存在广泛的搜寻摩擦,自动化对劳动力市场产生的冲击不会立即通过工资或就业来调整,因此现有关于自动化

技术影响劳动力流动的研究缺乏对劳动力市场摩擦机制的刻画。相较于以往研究,本文从劳动搜寻摩擦的视角出发,在微观层面内生化了企业的人机选择过程与劳动力流动决策,分析了工业自动化对劳动力市场摩擦机制的影响。

在技术进步影响劳动力流动的逻辑链条中,收入差距的作用不容忽视(张君凯和张世伟,2024;基建红和付晶晶,2022;张元钊等,2025)。已有研究表明,自动化发展与收入不平等呈现显著的正相关(Goyal and Aneja, 2020)。从技能水平上来看,现有研究指出技术进步推动了工资结构的变化,对高技能劳动力的工资提升更为显著,而中低技能劳动者会因此遭受损失,因而在一定程度上扩大了收入差距(Acemoglu, 2002; Moutos, 2006; 周广肃和丁相元,2022; Wang et al., 2023)。从部门间的就业和收入波动来看,Li et al.(2020)的研究表明,部门间的相对就业结构受到技术差距与实际工资差的共同驱动,技术水平越高、实际工资越高的制造业部门,其对劳动力的吸引力也越强;从地区间收入差距的角度来看,Gao et al.(2024)基于任务分工理论发现,工业自动化通过就业的替代效应、创造效应和补偿效应,显著扩大了城市间居民的收入差距。尽管已有研究考虑了收入差距在工业自动化影响劳动力流动过程中的重要作用,但是鲜有研究从微观角度描述自动化技术的发展如何影响收入差距,进而影响劳动力流动的机制。本文结合中国劳动力市场的现实^①,通过构建动态随机一般均衡模型,在一个统一的框架下对“自动化技术发展—收入差距—劳动力流动”的机制进行了细致刻画,考察了区域间自动化技术的不平衡发展对不同地区制造业企业的劳动力需求与劳动力供给的影响,回答了地区间产业分工与劳动力市场扭曲是如何产生的问题。

二、简要理论分析

早在20世纪,熊彼特就提出经济发展是由创新所引发的一系列不均衡和“创造性破坏”过程推动的,他认为创新是不断从内部破坏旧有经济结构,生成新经济结构的过程(Schumpeter, 2013)。后来Aghion and Howitt(1994)在“创造性破坏”的框架下,使用搜寻与匹配理论讨论了技术进步对就业的影响机制,认为技术进步可在两个方面影响就业,分别为“创造性破坏”效应和资本化效应。“创造性破坏”效应是指新的技术使用在推动经济增长的同时,对使用过时技术的部门产生冲击,导致落后技术部门的劳动力失业。另外,技术进步促使边际报酬也在上升,厂商有动机使用新技术扩大生产,以赚取技术进步所带来

^① 详情请见附录I.2。

的新增利润。在这个过程中,厂商对劳动力的需求也呈现扩大趋势,该效应被称为资本化效应。

近年来随着工业自动化的发展,学者发现自动化的扩张也存在着“创造性破坏”,能够替代劳动,减少企业劳动需求,抑制劳动者的溢价能力(Acemoglu and Restrepo, 2018a、2018b)。在任务模型下,当自动化设备相对比劳动力具有优势时,厂商倾向于“机器换人”(陈彦斌等,2019)。通常而言,重复性、常规性任务更容易由工业机器人、人工智能等自动化设备完成(Autor et al., 2003),因此从事此类工作的劳动力也更容易被自动化设备所取代,在这种“替代效应”下,企业会降低对劳动力的需求水平,减少整体雇佣规模。

在重复性、常规性任务被自动化设备取代的同时,自动化设备等高效率生产要素的使用会促进生产率的提高,即存在着“生产率效应”。在“生产率效应”的作用下,厂商生产成本得以降低,产品价格下降,居民实际收入上升,因而增加了居民对产品与服务的需求,促进厂商扩大未被自动化替代工作任务的劳动力需求。这种生产率的提高一是来源于互补效应,即自动化设备与高技能劳动力协作来实现“ $1+1>2$ ”型的生产率跃升(Acemoglu and Restrepo, 2020;黄卓等,2024);二是来源于要素投入结构优化(Acemoglu and Restrepo, 2019;闫雪凌等,2020),即工业自动化通过替代效应直接减少对低技能劳动力的需求,同时通过生产率效应提升平均生产效率。

假设某企业内部设有 n 个岗位,各岗位对应的劳动生产率从 1 至 n 离散排列。若当前机器人的生产率为 3,则企业将使用机器人替代所有生产率低于 3 的岗位。此时,剩余岗位数量为 $n-2$,其平均劳动生产率为 $(n+2)/2$ 。随着机器人技术的不断进步,其生产率也相应提高。在这一过程中,机器人开始能够胜任原本超出其能力范围的岗位任务,进一步扩大了对低生产率岗位的替代范围。如果机器人的生产率从 3 提升至 5,则被淘汰的岗位增至 4 个,剩余岗位数为 $(n+4)/2$ 。由此可见,机器人生产率的提升不仅扩大了替代范围,还推动了整体平均生产率的提高。

这一理论印证了 Baumol(1967)的发现,技术进步会显著提升单位劳动产出,从而导致劳动生产率增长较快的部门出现劳动力规模缩减的现象。世界贸易组织(WTO, 2017)的实证研究进一步支持这一观点:1970—2011年间,美国和德国作为典型工业化国家,其制造业就业人数占总劳动力比重呈现持续下降态势,而同期制造业劳动生产率却保持稳定增长。本文通过对中国 2010—2019 年间第二产业就业结构与生产率变动的分析发现(见图 2),第二产业就业占比从 2010 年的 28.7%下降至 2019 年的 28.1%,而同期劳动生产率则不断上升,呈现出典型的“就业占比下降—生产率上升”的负向关联特征,这与 Baumol 理

论预期完全吻合。

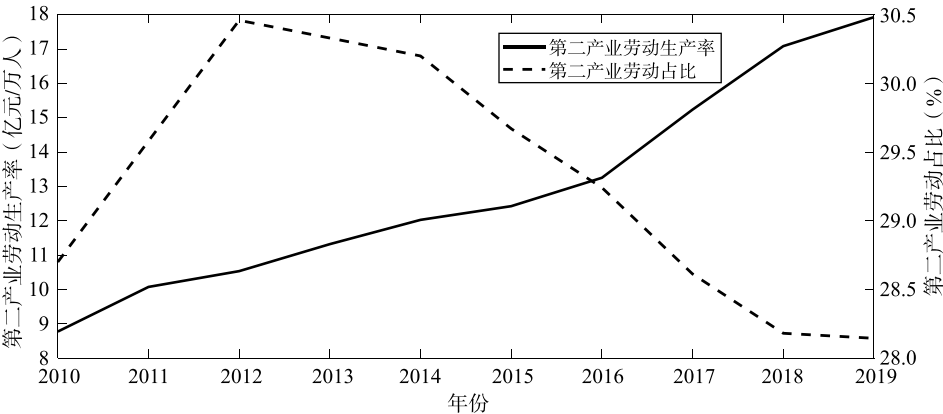


图2 2010—2019年中国第二产业劳动生产率与第二产业劳动力占比

注：第二产业劳动生产率 = $\frac{\text{第二产业增加值(亿元)}}{\text{第二产业就业人员(万人)}}$ ；第二产业劳动占比 = $\frac{\text{第二产业就业人员(万人)}}{\text{总就业人员(万人)}}$ 。

数据来源：国家统计局。

三、模型构建

本文基于上述简要理论分析以及 Krause and Lubik(2007)所提出的理论框架,构建了一个融合工业自动化与区域间劳动力流动特征的搜寻与匹配模型。本模型框架如图3所示：

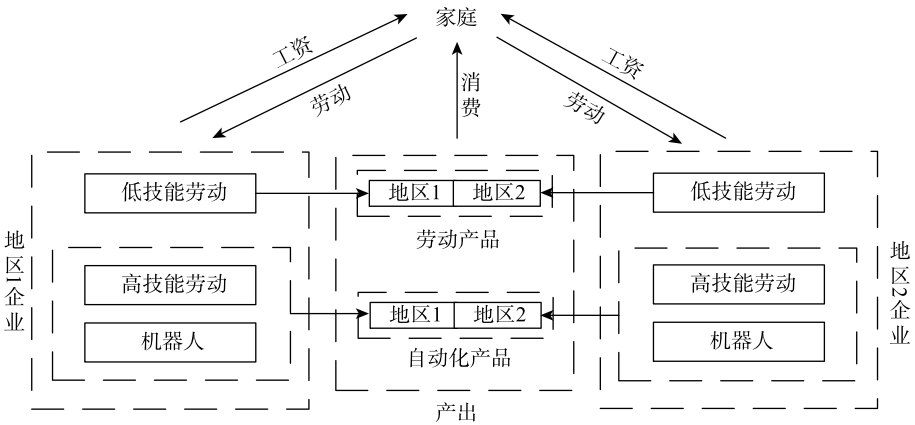


图3 动态随机一般均衡模型框架

本文存在两地区,共有5个部门,分别是地区1与地区2的最终产品部门,

地区 1 与地区 2 的中间产品部门,家庭部门。各部门通过总产品价格($p_{i,t}$)、机器人产品价格($p_{i,t}^a$)、劳动产品价格($p_{i,t}^n$)、高技能劳动工资($w_{i,t,t}$)、低技能劳动工资($w_{l,t,t}$), $i \in \{1, 2\}$, 在各部门间达到一般均衡与市场出清。

(一) 最终产品部门

两个地区的最终产品 $y_{i,t}$ 分别由劳动产品 $y_{i,t}^n$ 与机器人产品 $y_{i,t}^a$ 所构成, 最终产品的生产函数为 CES 函数, 具体形式如公式(1)所表示, $i \in \{1, 2\}$ 。

$$y_{i,t} = [x^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,t}^a)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-x)^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,t}^n)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, \quad (1)$$

其中, x 表示机器人产品占总产品的权重, σ 表示两种产品之间的替代弹性。本文在完全竞争市场假设下, 劳动产品 $y_{i,t}^n$ 与机器人产品 $y_{i,t}^a$ 的最优需求可由下述最优化过程表示:

$$\max p_{i,t} y_{i,t} - p_{i,t}^a y_{i,t}^a - p_{i,t}^n y_{i,t}^n. \quad (2)$$

经过最优化求解, 得到对劳动产品与机器人产品的需求函数如公式(3)与公式(4)所示:

$$\frac{p_{i,t}^a}{p_{i,t}} = \left(x \frac{y_{i,t}}{y_{i,t}^a} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (3)$$

$$\frac{p_{i,t}^n}{p_{i,t}} = \left((1-x) \frac{y_{i,t}}{y_{i,t}^n} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (4)$$

其中, $p_{i,t}$ 表示最终产品的价格, $p_{i,t}^a$ 为机器人产品的价格, $p_{i,t}^n$ 为劳动产品的价格。

(二) 劳动力市场

在劳动力市场中, 每期低技能劳动力要么在地区 1 制造业工作, 要么在地区 2 制造业工作, 否则处于失业状态。假设劳动总供给为 1, 则失业劳动力的数量由公式(5)表示:

$$u_t = 1 - n_{l,1,t} - n_{l,2,t}, \quad (5)$$

其中, u_t 表示 t 期处于失业状态的低技能劳动力数量, $n_{l,1,t}$ 表示 t 期在地区 1 工作的低技能劳动力数量, $n_{l,2,t}$ 表示 t 期在地区 2 就业的低技能劳动力数量。在每个地区的劳动力市场中, 岗位空缺与失业劳动力进行着匹配, 该匹配过程可用柯布-道格拉斯函数表示:

$$m_{1,t} = e_{1,t} ((1-\mu_t) u_t)^{\alpha} v_{1,t}^{1-\alpha}, \quad (6)$$

$$m_{2,t} = e_{2,t} (\mu_t u_t)^{\alpha} v_{2,t}^{1-\alpha}, \quad (7)$$

其中, $m_{i,t}$ 表示 t 期地区 i 的新增就业数量, $(1-\mu_t) u_t$ 表示 t 期前往地区 1 寻找工作的失业者数量, $\mu_t u_t$ 表示前往地区 2 寻找工作的失业者数量, μ_t 表示 t 期失业者中前往地区 2 求职者的比例, $v_{i,t}$ 表示企业所发布的空缺岗位, α 表示劳动

力市场中求职劳动力的求职弹性。 $e_{i,t}$ 表示匹配效率冲击,其服从一个AR(1)过程, $\log(e_{i,t}/\bar{e}) = \rho^e \log(e_{i,t-1}/\bar{e}) + \epsilon_{e,i,t}$, ρ^e 为冲击惯性参数, $0 < \rho^e < 1$, $\bar{e}$ 为稳态匹配效率, $\epsilon_{e,i,t}$ 为冲击水平, $\epsilon_{e,i,t} \sim N(0, \sigma_{e,i,t}^2)$, $\sigma_{e,i,t}$ 为匹配效率冲击的标准差。本文将地区 i 的新增就业数量与在该地区求职的失业者数量之比, 定义为失业劳动力的就业成功概率 $q_{i,t}^u$, 将地区 i 新增就业数量 $m_{i,t}$ 与地区 i 岗位空缺 $v_{i,t}$ 之比定义为企业招聘成功的概率 $q_{i,t}^v$, $i \in \{1, 2\}$ 。

$$q_{1,t}^u = \frac{m_{1,t}}{(1-\mu_t)u_t}, \quad q_{2,t}^u = \frac{m_{2,t}}{\mu_t u_t}, \quad (8)$$

$$q_{1,t}^v = \frac{m_{1,t}}{v_{1,t}}, \quad q_{2,t}^v = \frac{m_{2,t}}{v_{2,t}}. \quad (9)$$

除此之外, 地区 i 劳动力市场中岗位空缺与失业劳动力之比被称为市场紧度 $\theta_{i,t}$ 。市场紧度 $\theta_{i,t}$ 表示劳动力市场劳动需求与劳动供给之比, 市场紧度 $\theta_{i,t}$ 越高, 企业在当地的招聘越为困难。

$$\theta_{1,t} = \frac{v_{1,t}}{(1-\mu_t)u_t}, \quad \theta_{2,t} = \frac{v_{2,t}}{\mu_t u_t}. \quad (10)$$

(三) 中间产品部门

在企业的生产过程中, 地区 i 的企业可通过权衡机器人与劳动力的生产率, 确定最优的自动化水平。假设企业使用机器人和劳动力生产两种不同的产品分别为 $y_{j,i,t}^a$ 与 $y_{j,i,t}^n$, $i \in \{1, 2\}$, 在生产函数设定上, 本文参考 Leduc and Liu (2024) 的研究将劳动区分为高技能劳动与低技能劳动, 机器人与低技能劳动存在替代关系, 具体表现为不同劳动岗位 j 所需的劳动生产率 $a_{j,i,t}$ 存在异质性, 该异质性劳动生产率服从一个对数正态分布, $a_{i,t} \sim \text{LN}(0, \sigma_{i,a}^2)$ 。企业在进行自动化决策时存在一个临界劳动生产率 $\bar{a}_{i,t}$, 当岗位 j 的劳动生产率 $a_{j,i,t}$ 高于临界值 $\bar{a}_{i,t}$ 时, 劳动力在生产率上具备优势, 企业选择继续使用低技能劳动 $n_{l,j,i,t}$ 进行生产。反之, 当劳动生产率 $a_{j,i,t}$ 低于临界值 $\bar{a}_{i,t}$ 时, 企业将选择使用机器人 $A_{j,i,t}$ 代替低技能劳动进行生产。高技能劳动 $n_{h,i,t}$ 则与机器人 $A_{i,t}$ 互补, 机器人的生产率为 $a_{i,t}^*$, $a_{i,t}^*$ 服从一个 AR(1) 过程, $\log(a_{i,t}^*/a_i^*) = \rho^{a*} \times \log(a_{i,t-1}^*/a_i^*) + \epsilon_{a,i,t}$, ρ^{a*} 为冲击惯性参数, $0 < \rho^{a*} < 1$, a_i^* 为机器人的稳态生产率, $\epsilon_{a,i,t}$ 为冲击水平, $\epsilon_{a,i,t} \sim N(0, \sigma_{a,i,t}^2)$, $\sigma_{a,i,t}$ 为机器人生产率冲击的标准差。公式(11)表示企业的生产函数。

$$\begin{cases} y_{j,i,t}^n = z_t n_{l,j,i,t} a_{j,i,t}, & a_{j,i,t} > \bar{a}_{i,t} \\ y_{j,i,t}^a = z_t (A_{j,i,t} a_{i,t}^*)^{a_a} n_{sj,i,t}^{1-a_a}, & a_{j,i,t} \leq \bar{a}_{i,t} \end{cases}. \quad (11)$$

经加总后, 地区 i 企业中由劳动生产的产品的生产函数为:

$$y_{i,t}^n = z_t n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} a_{i,t} \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}. \quad (12)$$

地区 i 的企业中由机器人生产的产品的生产函数为:

$$y_{i,t}^a = z_t (A_{i,t} a_{i,t}^*)^{aa} n_{s,i,t}^{1-aa}, \quad (13)$$

$F(a_{i,t})$ 为随机变量 $a_{i,t}$ 的累积密度函数, $F(\bar{a}_{i,t}) = \int_0^{\bar{a}_{i,t}} dF(a_{i,t})$, $F(\bar{a}_{i,t})$ 可被视

为自动化概率。定义 $1 - F(\bar{a}_{i,t}) = \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} dF(a_{i,t})$, $H(\bar{a}_{i,t}) = \frac{\int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} a_{i,t} dF(a_{i,t})}{1 - F(\bar{a}_{i,t})}$,

则公式(12)可改写为:

$$y_{i,t}^n = z_t n_{l,i,t} H(\bar{a}_{i,t}), \quad (14)$$

其中, z_t 为一般性技术冲击, 服从一个 AR(1) 过程, $\log(z_t/\bar{z}) = \rho^z \times \log(z_{t-1}/\bar{z}) + \epsilon_{z,t}$, ρ^z 为冲击惯性参数, $0 < \rho^z < 1$, $\bar{z}$ 为技术水平的稳态值, $\epsilon_{z,t}$ 为冲击水平, $\epsilon_{z,t} \sim N(0, \sigma_{z,t}^2)$, $\sigma_{z,t}$ 为技术冲击的标准差。在 $t+1$ 期, 有比例为 δ_i 的在岗劳动力离职退出, 另有比例为 $F(\bar{a}_{i,t+1})$ 的在岗劳动力被机器人取代。因此, 在 $t+1$ 期地区 i 的就业劳动力数量等于上一期未离职且未被机器取代的劳动力数量, 具体表达形式见公式(15)。 δ_i 表示外生劳动力离职率, 表示除技术进步外其他破坏就业的因素。

$$n_{l,i,t+1} = (1 - \delta_i) (1 - F(\bar{a}_{i,t+1})) (n_{l,i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}). \quad (15)$$

由于在 $t+1$ 期有比例为 $F(\bar{a}_{i,t+1})$ 的在岗劳动力被机器人取代, 因此在 $t+1$ 期, 新增的机器人数量可由公式(16)表示:

$$I_{i,t}^a = (1 - \delta_i) F(\bar{a}_{i,t+1}) (n_{l,i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}). \quad (16)$$

地区 i 企业的机器人数量由公式(17)所表示:

$$A_{i,t+1} = (1 - \rho^a) A_{i,t} + I_{i,t}^a. \quad (17)$$

地区 i 企业此时所面临的最优化问题为: 选择最优空缺职位、最优高技能劳动使用量、最优低技能劳动使用量、最优工业机器人使用量、最优临界生产率, 以实现利润最大化:

$$\Pi_{i,t} = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{\lambda_t}{\lambda_0} \left(y_{i,t} - n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1 - F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} - \right. \\ \left. w_{s,i,t} n_{s,i,t} - \kappa_{1,i} v_{i,t} - \kappa_{2,i} A_{i,t} \right), \quad (18)$$

其中, $\kappa_{1,i}$ 与 $\kappa_{2,i}$ 分别表示两地区的企业开放一个新岗位与使用机器人的单位成本, $\beta^t \lambda_t / \lambda_0$ 为随机贴现因子。该最优化问题的约束条件为公式(15)与公式(17)。通过构建拉格朗日方程进行最优化求解, 可得到该问题的若干一阶最优条件^①。最优一阶条件中的公式(19)如下所示:

① 具体一阶条件请见附录 II.1。

$$p_{i,t}^n \bar{z}_t \bar{a}_{i,t} - w_{l,i,t}(\bar{a}_{i,t}) + \frac{\kappa_{1,i}}{q_{i,t}^v} = p_{i,t}^a \bar{z}_t a_{i,t}^* - \kappa_{2,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \rho^a) \mu_{2,i,t+1}, \quad (19)$$

其中, $\mu_{2,i,t+1}$ 表示约束条件式(17)的拉格朗日乘子。公式(19)表示, 企业在使用工业机器人的临界生产率的水平上, 新雇用一单位劳动的边际收益等于改用一单位工业机器人设备的边际收益。

(四) 家庭部门

根据经典真实经济周期(Real Business Cycle, RBC)模型对代表性家庭的设定, 家庭向地区 i 提供劳动, 获取劳动收入, 同时进行消费和储蓄。代表性家庭的最优化目标是通过选择消费和劳动供给, 使自身效用最大化^①。

$$\max E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[\frac{c_t^{1-\sigma^c} - 1}{1 - \sigma^c} \bar{w} n_{s,t} \right], \quad (20)$$

其中, E_0 表示期望因子, β 表示贴现率, c_t 为消费, σ^c 为常相对风险厌恶(Constant Relative Risk Aversion, CRRA)家庭风险偏好因子, $\bar{w}$ 为劳动负效用的权重。家庭面临的预算约束为公式(21)^②。

$$c_t + d_t + \sum_{i=1}^2 q_{i,t} = \sum_{i=1}^2 Wage_{l,i,t} + \sum_{i=1}^2 Wage_{s,i,t} + b + r_{t-1} d_{t-1} + \sum_{i=1}^2 \Pi_{i,t}, \quad (21)$$

其中, d_t 表示家庭持有的储蓄; $q_{i,t}$ 表示劳动力前往地区 i 寻找工作所需付出的调整成本; b 为总失业补贴; $Wage_{l,i,t}$ 表示地区 i 的低技能劳动力的劳动收入, $Wage_{l,i,t} = n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1 - F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} - b_i n_{l,i,t}$, 其中 b_i 表示地区 i 劳动力失业补贴的系数, $w_{l,i,t} = \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1 - F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}$ 表示地区 i 的低技能劳动力平均工资; $Wage_{s,i,t}$ 为高技能劳动力收入, $Wage_{s,i,t} = w_{s,i,t} n_{s,i,t}$, 其中 $w_{s,i,t}$ 为两地区高技能劳动力工资, $n_{s,i,t}$ 表示两地区高技能劳动量, 高技能劳动量的加总过程为 CES 过程, $n_{s,t} = [\nu_n^{\frac{1}{\mu_n}} (n_{s,1,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu_n}} + (1-\nu_n)^{\frac{1}{\mu_n}} \times (n_{s,2,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu_n}}]^{\frac{\mu_n}{\mu_n-1}}$, $n_{s,t}$ 为高技能劳动的总劳动量, 其中 ν_n 为权重参数, μ_n 为两地区高技能劳动之间的替代弹性; r_{t-1} 表示 $t-1$ 期的储蓄利率; $\Pi_{i,t}$ 表示家庭从地区 i 所获企业利润。 t 期在地区 1 处于就业状态的低技能劳动力数量 $n_{l,1,t}$ 由

① Leduc and Liu(2024)认为高技能劳动力市场不存在劳动摩擦, 因此此处参考 Oikonomou(2023)的研究, 将高技能劳动力供给劳动的负效用纳入效用函数。

② $q_{1,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-\mu_t)u_t$, $q_{2,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} \right)^2 \mu_t u_t$, Γ_h 为调整成本的系数。

$t-1$ 期在地区 1 继续工作的低技能劳动力 $n_{l,1,t-1}$ 与地区 1 新增低技能就业 $q_{1,t-1}^u(1-\mu_{t-1})u_{t-1}$ 组成:

$$n_{l,1,t} = (1-\delta_l)(1-F(\bar{a}_{1,t}))(n_{l,1,t-1} + q_{1,t-1}^u(1-\mu_{t-1})u_{t-1}). \quad (22)$$

t 期地区 2 的低技能劳动力数量 $n_{l,2,t}$ 由 $t-1$ 期在地区 2 继续工作的低技能劳动力 $n_{l,2,t-1}$ 与地区 2 新增低技能就业 $q_{2,t-1}^u\mu_{t-1}u_{t-1}$ 组成:

$$n_{l,2,t} = (1-\delta_l)(1-F(\bar{a}_{2,t}))(n_{l,2,t-1} + q_{2,t-1}^u\mu_{t-1}u_{t-1}). \quad (23)$$

家庭在预算约束式(21),以及劳动力数量演化公式(22)与公式(23)的约束下,选择最优消费 c_t 、最优储蓄 d_t 、最优迁移率 μ_t 、最优劳动供给量 $n_{l,1,t}, n_{l,2,t}, n_{s,1,t}, n_{s,2,t}$, 以实现家庭效用最大化。通过构建拉格朗日方程,可求解一阶最优条件^①。

(五) 工资设定

本文基于劳资双方工资议价的理论框架,假定企业与低技能劳动者通过协商机制确定工资水平,以实现双方议价剩余的最大化。就地区 1 而言^②,在 t 期企业选择雇用—个低技能劳动力的边际报酬为 $p_{1,t}^n z_t a_{1,t}$, 支付工资 $w_{l,1,t}(a_{1,t})$ 。如果下一期该岗位仍由低技能劳动力胜任,企业获得雇用工人的价值 $J_{1,t+1}^e$, $J_{1,t+1}^e = \int_{\bar{a}_{1,t+1}}^{\infty} J_{1,t+1}^e(a_{1,t+1}) \frac{f(a_{1,t+1})}{1-F(\bar{a}_{1,t+1})} da_{1,t+1}$; 若低技能劳动力被工业机器人替代,则企业将获得相应的机器人边际产出价值 $J_{1,t+1}^a$; 若岗位空缺,则企业获得岗位保持空缺的价值 $J_{1,t+1}^v$ 。综上所述,企业在 t 期雇用低技能劳动力进行生产所获得的价值 $J_{1,t}^e(a_{1,t})$ 可如公式(24)所表示:

$$J_{1,t}^e(a_{1,t}) = \alpha_a p_{1,t}^n z_t a_{1,t} - w_{l,1,t}(a_{1,t}) + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta_l)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))J_{1,t+1}^e + \\ & (1-\delta_l)F(\bar{a}_{1,t+1})J_{1,t+1}^a \\ & + \delta_l J_{1,t+1}^v \end{aligned} \right]. \quad (24)$$

t 期时,若地区 1 企业使用机器人进行生产,则企业获得使用机器人所带来的价值 $J_{1,t}^a, J_{1,t}^a$ 如公式(25)所示:

$$J_{1,t}^a = \alpha_a p_{1,t}^a z_t (a_{1,t}^*)^{\alpha_a} A_{1,t}^{\alpha_a-1} n_{s,1,t}^{1-\alpha_a} - \kappa_{21} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1-\rho^a) J_{1,t+1}^a. \quad (25)$$

高技能劳动与机器人之间存在互补效应,所以企业对高技能劳动的需求函数为:

$$w_{s,1,t} = (1-\alpha_a) p_{1,t}^a z_t (a_{1,t}^* A_{1,t})^{\alpha_a} n_{s,1,t}^{-\alpha_a}, \quad (26)$$

① 具体一阶条件请见附录 II.2。

② 地区 2 的一阶条件请见附录 II.3。

公式(26)表示高技能劳动力工资等于其边际产出,地区1机器人生产率 $a_{1,t}^*$ 的提高,可增加高技能劳动力的边际产出,进而增加企业对高技能劳动力的需求。

在 t 期,地区1企业开放岗位的成本为 κ_{11} 。若在 $t+1$ 期该岗位被低技能劳动力所填补,那么企业获得雇用工人的价值 $J_{1,t+1}^e$ 。若制造业企业使用机器人,则制造业企业获得使用机器人的价值 $J_{1,t+1}^a$,若职位继续保持空缺,则企业获得职位空缺的价值 $J_{1,t+1}^v$ 。综上所述,制造业企业开放一个岗位的价值 $J_{1,t}^v$ 由公式(27)所示^①:

$$J_{1,t}^v = -\kappa_{1,t} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))q_{1,t}^v J_{1,t+1}^e + \\ & (1-\delta_1)F(\bar{a}_{1,t+1})q_{1,t}^v J_{1,t+1}^a + \\ & q_{1,t}^v J_{1,t+1}^v \end{aligned} \right]. \quad (27)$$

若劳动力在 t 期处于就业状态,则低技能劳动力获得工资收入 $w_{1,t}(a_{1,t})$ 。处于就业状态的劳动力要么继续处于就业状态,要么处于失业状态。若低技能劳动力处于就业状态,则劳动力获得就业的价值 $W_{1,t+1}$, $W_{1,t+1} = \int_{\bar{a}_{1,t+1}}^{\infty} W_{1,t+1}(a_{1,t+1}) \frac{f(a_{1,t+1})}{1-F(\bar{a}_{1,t+1})} da_{1,t+1}$ 。如果低技能劳动力处于失业状态,则劳动力获得失业的价值 $U_{1,t+1}$ 。综上可得低技能劳动力就业的价值 $W_{1,t}(a_{1,t})$:

$$W_{1,t}(a_{1,t}) = w_{1,t}(a_{1,t}) + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))W_{1,t+1} + \\ & (1-(1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})))U_{1,t+1} \end{aligned} \right]. \quad (28)$$

如果低技能劳动力在 t 期处于失业状态,那么低技能劳动力获得失业保障 b_1 ,并支付前往地区1或者地区2寻找工作的调整成本 $\xi_{1,t}\mu_t$ 和 $\xi_{2,t}(1-\mu_t)$ 。在 $t+1$ 期,若低技能劳动力在地区1制造业企业找到新工作,则低技能劳动力获得就业的价值 $W_{1,t+1}$ 。如果在 $t+1$ 期低技能劳动力在地区1失业,则低技能劳动力获得失业的价值 $U_{1,t+1}$ 。如果低技能劳动力在地区2寻找到的工作,那么低技能劳动力获得就业的价值为 $W_{2,t+1}$ 。此外 t 期处于地区1的低技能劳动力在 $t+1$ 期不可能在地区2获得失业的价值 $U_{2,t+1}$,因此 $U_{2,t+1}$ 在此处相当于机会成本。综上可得失业的价值 $U_{1,t}$,如公式(29)所示。

$$U_{1,t} = b_1 - \xi_{1,t}(1-\mu_t) - \xi_{2,t}\mu_t + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))q_{1,t}^u(1-\mu_t)W_{1,t+1} + \\ & (1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,t}^u\mu_t W_{2,t+1} + \\ & (1-(1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})))q_{1,t}^u(1-\mu_t)U_{1,t+1} - \\ & (1-\delta_1)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,t}^u\mu_t U_{2,t+1} \end{aligned} \right]. \quad (29)$$

① 在典型搜寻与匹配模型中, $J_{1,t}^v=0$,表示在均衡中岗位空缺无利可图也不亏损。

本文采用经典的搜寻与匹配模型设定,将工资视为低技能劳动力与企业通过议价过程确定的均衡结果。该均衡工资通过最大化就业状态下低技能劳动力与企业双方的净剩余之积,实现最优配置。低技能劳动力所获得的净剩余为 $W_{1,t}(a_{1,t}) - U_{1,t}$,企业得到的净剩余为 $J_{1,t}^e(a_{1,t}) - J_{1,t}^v$ 。该最优化问题如公式(30)所示:

$$\max (W_{1,t}(a_{1,t}) - U_{1,t})^\eta (J_{1,t}^e(a_{1,t}) - J_{1,t}^v)^{1-\eta}, \quad (30)$$

其中, η 表示劳动力的工资议价能力, $0 < \eta < 1$,该最优化问题的最优条件为:

$$W_{1,t}(a_{1,t}) - U_{1,t} = \frac{\eta}{1-\eta} J_{1,t}^e(a_{1,t}). \quad (31)$$

如上文所述,企业使用机器人的临界生产率 $\bar{a}_{1,t}$ 被定义为边际收益相等时的劳动生产率,即企业增加一单位劳动与增加一单位机器人使用所带来的边际收益相等时的生产率水平,因此有 $J_{1,t}^e(\bar{a}_{1,t}) = J_{1,t}^a$,结合家庭部门与企业部门一阶条件与公式(31)可以得到工资的决定方程:

$$\begin{aligned} w_{1,t} = & (1-\eta)(b_1 - \xi_{1,t}) + \eta p_{1,t}^n z_t H(\bar{a}_{1,t}) + \eta \frac{\kappa_{11}}{q_{1,t}^v} - \\ & \eta \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - q_{1,t}^u) (1 - \delta_1) (1 - F(\bar{a}_{1,t+1})) J_{1,t+1}^e. \end{aligned} \quad (32)$$

结合公式(19),并对公式(32)进行改写可得到关于临界生产率 $\bar{a}_{1,t}$ 的决定条件,该决定条件由公式(33)表示。

$$\bar{a}_{1,t} = \frac{1}{p_{1,t}^n z_t} \left[b_1 - \xi_{1,t} + \left(\frac{\eta q_{1,t}^u - 1}{1-\eta} \right) \frac{\kappa_{11}}{q_{1,t}^v} + \frac{J_{1,t}^a}{1-\eta} + \frac{\eta}{1-\eta} (1 - q_{1,t}^u) \times \right. \\ \left. \frac{J_{1,t}^a - \alpha_a p_{1,t}^a z_t (a_{1,t}^*)^{\alpha_a} A_{1,t}^{\alpha_a-1} n_{s,1,t}^{1-\alpha_a} + \kappa_{21}}{1-\rho^a} (1 - \delta_1) F(\bar{a}_{1,t+1}) \right], \quad (33)$$

公式(33)说明企业使用机器人的临界生产率 $\bar{a}_{1,t}$ 受自动化生产设备生产率 $a_{1,t}^*$ 的影响,更高的机器人生产率 $a_{1,t}^*$ 可促使企业在生产中以更高的可能性选择机器人,因此提升了临界生产率 $\bar{a}_{1,t}$ 以及企业的自动化生产概率 $F(\bar{a}_{1,t})$ 。

(六) 市场出清

在该模型中,产出用于支付家庭部门的消费、地区1与地区2的企业的招聘成本、使用机器人的成本以及劳动力流动的调整成本,所以市场出清条件如公式(34)所示:

$$\begin{aligned} c_t + \kappa_{11} v_{1,t} + \kappa_{12} A_{1,t} + \kappa_{21} v_{2,t} + \kappa_{22} A_{2,t} + \\ \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-\mu_t)u_t + \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} - 1 \right)^2 \mu_t u_t = y_t, \end{aligned} \quad (34)$$

其中, y_t 表示总产出, 总产出由地区 1 的产出 $y_{1,t}$ 与地区 2 的产出 $y_{2,t}$ 所构成, 具体形式如公式(35)所示:

$$y_t = [\varphi^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{1,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\varphi)^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{2,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}}]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}}, \quad (35)$$

其中, φ 表示地区 1 的产出占总产品的权重, ϵ 表示两种产品之间的替代弹性。地区 1 产出与地区 2 产出的需求由公式(36)与公式(37)所示:

$$\frac{p_{1,t}}{p_t} = \left(\varphi \frac{y_t}{y_{1,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (36)$$

$$\frac{p_{2,t}}{p_t} = \left((1-\varphi) \frac{y_t}{y_{2,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (37)$$

其中, p_t 表示总产出的价格, 本文设为 1。

模型共有 52 个变量, 分别为: $r_t, \mu_t, c_t, y_t, u_t, z_t, n_{1,t}, m_{1,t}, e_{1,t}, v_{1,t}, q_{1,t}^u, q_{1,t}^v, \theta_{1,t}, y_{1,t}^n, y_{1,t}^a, \bar{a}_{1,t}, A_{1,t}, y_{1,t}, p_{1,t}^n, p_{1,t}^a, w_{l,1,t}, a_{1,t}^*, J_{1,t}^a, J_{1,t}^e, J_{2,t}^e, J_{2,t}^a, \lambda_{1,t}, \lambda_{2,t}, n_{2,t}, m_{2,t}, e_{2,t}, v_{2,t}, q_{2,t}^u, q_{2,t}^v, \theta_{2,t}, y_{2,t}^n, y_{2,t}^a, \bar{a}_{2,t}, A_{2,t}, y_{2,t}, p_{2,t}^n, p_{2,t}^a, w_{2,t}, a_{2,t}^*, \lambda_t, p_{1,t}, p_{2,t}, n_{s,1,t}, n_{s,2,t}, w_{s,1,t}, w_{s,2,t}, n_{st}$, 以及 52 个方程^①。

四、参数校准与模型机制分析

(一) 参数校准

在参数赋值方面, 本文按照参数属性的不同将需要赋值的参数分为两类。第一类参数需要通过参考过去经典文献或查阅统计数据, 观察其对家庭与企业等部门的特征的刻画进行赋值, 相关的参数包括 $\{\beta, x, \alpha, \sigma, \sigma^c, \delta_1, \delta_2, \Gamma_h, \eta, \rho^o, \epsilon, \alpha_u\}$ 。第二类参数由模型均衡条件内生决定 $\{\kappa_{11}, \kappa_{12}, b_1, b_2, \kappa_{21}, \kappa_{22}, v_n, \bar{w}, \mu_n\}$ 。^②

(二) 模型机制分析

在模型构建部分, 本研究基于搜寻与匹配理论框架, 创新性地构建了一个包含机器人应用决策过程和劳动力流动决策过程的理论模型, 旨在模拟自动化水平提升对区域间劳动力收入差距产生影响的动态机制, 并进一步探讨其对劳动力空间配置格局的潜在效应。本小节将重点阐释模型变量间的内生传导路

① 详情请见附录 II.4。

② 详情请见附录 III。

径,通过对数线性化方法^①详细论证各经济变量间的相互作用机制,从而为后文的脉冲响应分析提供坚实的分析基础^②。

五、模拟结果分析

(一) 脉冲响应分析

在完成模型均衡条件求解与参数校准的基础上,本文运用 Dynare 5.3 软件对模型进行数值模拟,获得了两个地区产出、工资、就业等关键经济变量对机器人生产率冲击的脉冲响应函数。

本文设定地区 1 为工业机器人使用水平较高的地区,图 4 展示了在单位标准差的正向工业机器人生产率冲击下,地区 1 的产出、工资、就业及劳动力流动的脉冲响应。模拟结果表明,当地区 1 的机器人生产率得到提高时,带动了企业自动化的劳动力临界上升(见图 4(a)),该地区的自动化概率提升(见图 4(b)),进而替代部分低生产率要求岗位,从而产生机器替代劳动力的过程,在该过程中,由于技术进步所带来的要素投入结构优化,与机器人存在竞争关系的低技能劳动力的生产率上升。这一过程产生以下影响:①较低生产率岗位被工业机器人所取代后,会导致低技能劳动力就业与产出下降(见图 4(c)与图 4(d)),并且更多的失业劳动力被该地区较高的工资水平所吸引(见图 4(e)),进而选择前往地区 1 寻找工作(见图 4(f))。②自动化概率的上升增加了企业对机器人的需求量(见图 4(g)),进而提升机器人生产部门的产出(见图 4(h))。

然而,自动化过程并非仅表现为岗位破坏效应,同时也伴随着岗位创造效应。机器人的使用优化了要素结构,提高了低技能劳动的生产率。企业利润会得益于机器人的使用而提高,从而激励企业扩大招聘规模,表现为岗位空缺增加(见图 4(i))。因此,冲击发生后,低技能劳动力就业的短期下滑(见图 4(c))与岗位空缺(见图 4(i))并存,反映了自动化对劳动力市场的双重影响:既有就岗位的替代,也有新的劳动力需求形成。

此外,由于高技能劳动力与机器人具有互补性,机器人生产率的提升直接提高了高技能劳动力的边际产出,进而推动了其工资上涨(见图 4(j)),更多的高技能劳动力愿意增加劳动供给,最终表现为高技能劳动力就业量的上升(见图 4(k))。

① 对模型均衡条件进行对数线性化是探求不同动态变量之间关系的重要方法,但受限于本文模型规模庞大以及单一均衡条件复杂程度高,因此本文在编程过程中使用非线性方法,仅为展示机制考虑,对个别重要条件进行线性化。

② 详细内容见附录 IV。

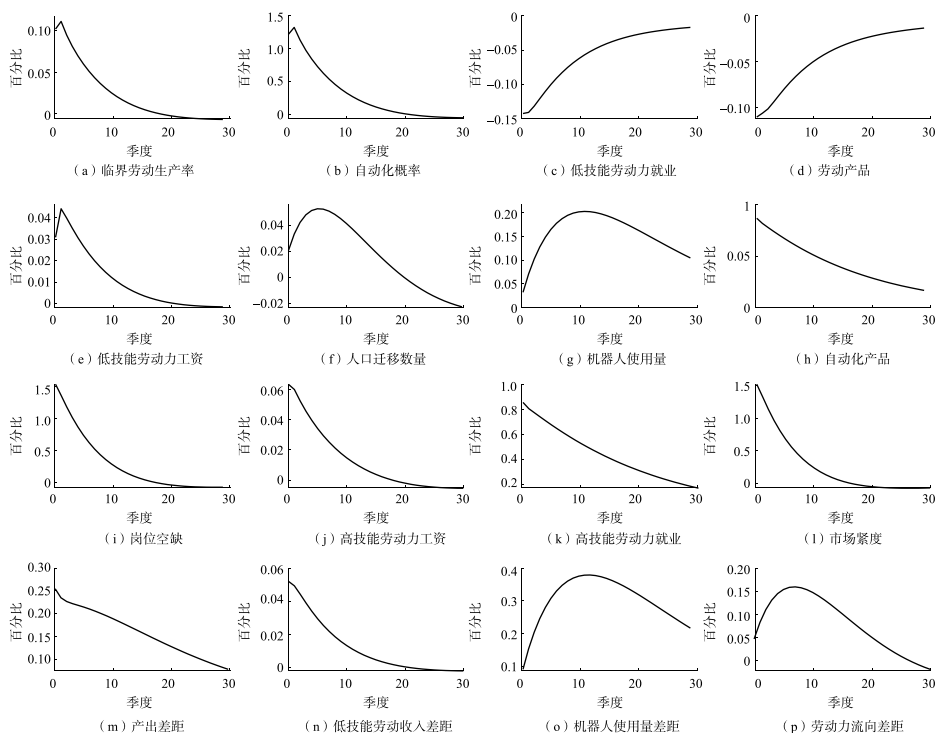


图4 地区1中各经济变量在地区1正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

注：子图中横轴为时间（单位：季度）。前三行子图纵轴为变量偏离稳态的百分比（单位：%）；第四行子图为两地区间部分关键变量之比，表示两地区间部分经济变量的差距，纵轴为变量偏离稳态的绝对值（单位：%）。第四行子图从左到右的度量方式分别为： $y_{1,t}/y_{2,t}$ 、 $w_{l,1,t}/w_{l,2,t}$ 、 $A_{1,t}/A_{2,t}$ 、 $(1-\mu_t)/\mu_t$ 。

就地区2而言，如图5所示，地区1机器人生产率的提升通过工资传导机制对劳动力流动产生了显著影响。具体而言，地区1因生产率提高而带来的工资增长形成了明显的虹吸效应，吸引地区2的失业劳动力持续向地区1迁移并寻找工作（见图5(f)）。在劳动供给变动与劳动需求变动的共同作用下，地区2呈现出以下发展特征：一方面，低技能劳动力就业量（见图5(c)）和劳动产出（见图5(d)）均有所增长；另一方面，由于自动化进程的相对滞后，地区2的机器人使用量下滑（见图5(g)），这也导致其自动化产品产量走低（见图5(h)），该地区自动化进程的落后影响了新岗位空缺的创建（见图5(i)）。最后，高技能劳动力则由于外流导致供给不足（见图5(k)），从而提升了其工资水平（见图5(j)）。

综上所述，在地区1机器人生产率冲击下，地区1通过技术升级和自动化扩张吸引并积聚高技能与部分低技能劳动力，形成技术密集型与高技能密集型为特点的发展模式；而地区2则因自动化进程滞后与劳动力外流，逐步转向以低技能劳动力为主导的劳动密集型产业发展模式。由此，基于要素禀赋变化与技术扩散差异，地区间的分工格局得以形成。

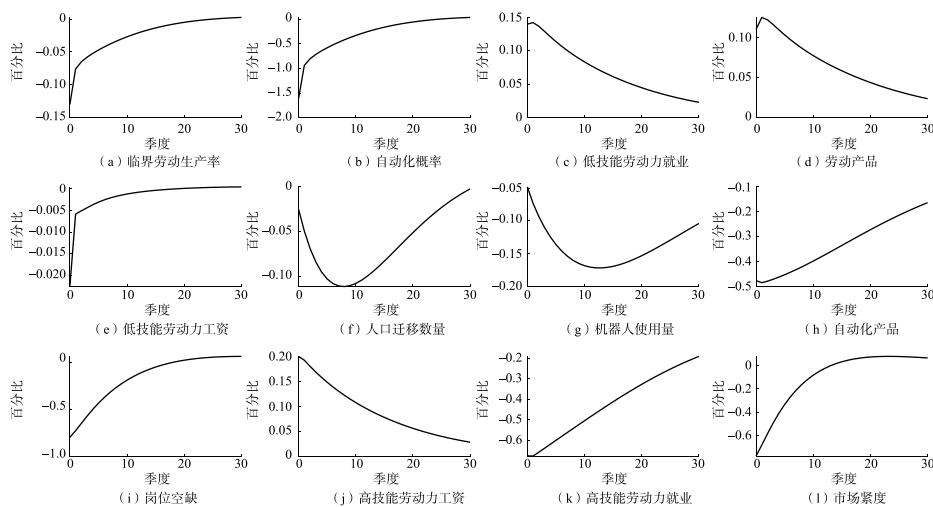


图 5 地区 2 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

注：同图 4。

(二) 劳动力市场扭曲情况分析

为考察工业自动化进步对劳动力市场中岗位空缺与求职人员之间配置效率的影响,本文基于模型稳态,研究了地区 1 自动化概率 $F(\bar{a}_1)$ 从 0.10 上升至 0.15 过程中贝弗里奇曲线(Beveridge Curve)^①的偏移变化情况。根据模型均衡条件推导出的地区 1 劳动市场贝弗里奇曲线如公式(38)所示,地区 2 的贝弗里奇曲线推导过程类似,不再赘述。

$$u_1 = \frac{(\delta + \delta(1 - F(\bar{a}_1)))(1 - u_2)}{1 - (1 - \delta)(1 - F(\bar{a}_1))(1 - 2q_1^u(\theta_1))}. \quad (38) \quad ②$$

图 6 显示,贝弗里奇曲线随地区 1 自动化程度的加深而向右移动,表明同等劳动市场紧度下,失业增加,劳动力市场扭曲程度加深。如上文所述,地区 1 工业自动化水平的进步一方面对旧有岗位产生破坏,又创造出新的岗位空缺;另一方面,地区 1 生产率的提升所带来的工资上涨却又吸引着劳动力流入该地区,因此工业自动化水平的提高在一定程度上加剧了地区 1 区域内劳动力扭曲程度,即较高的失业人群伴随着较多的岗位空缺。

根据图 7 可以看出,随着自动化程度的加深,提高劳动力匹配弹性 α 可以

① 贝弗里奇曲线描述了失业率与市场紧度之间的负相关关系,反映劳动力市场的匹配状况(Blanchard and Diamond, 1989)。正常情况下,曲线呈向下倾斜,失业率高伴随市场紧度低,反之亦然。当曲线向外偏移,即在相同市场紧度下失业率上升,通常被视为劳动力市场扭曲加剧的表现。通过跟踪贝弗里奇曲线的位置变化,可以间接衡量配置效率,揭示失业与岗位空缺并存的结构性问题。

② $q_1^u(\theta_1) = \theta_1^{1-\alpha}$ 。

缓解技术进步所带来的劳动力市场扭曲问题,这意味着通过提升劳动者就业能力和岗位适配性的就业促进政策,有助于缓解劳动力市场中的结构性扭曲,例如强化就业指导体系以及健全求职招聘体系等措施。与此同时,较高的外生离职率 δ_1 会在一定程度上造成失业,加重自动化进程所带来的岗位淘汰压力,不利于缓解自动化升级背景下的劳动力市场扭曲问题。

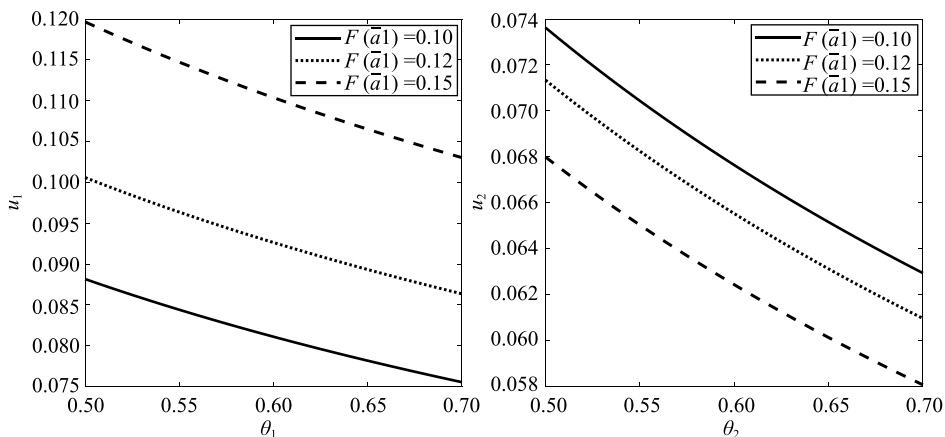


图6 不同自动化程度下的贝弗里奇曲线变化情况

注:图6中左图横轴表示地区1劳动力市场紧度 θ_1 ,纵轴表示地区1失业率 u_1 , $u_1 = (1-\mu)u$;右图中横轴表示地区2劳动力市场紧度 θ_2 ,纵轴表示地区2失业率 u_2 , $u_2 = \mu u$ 。

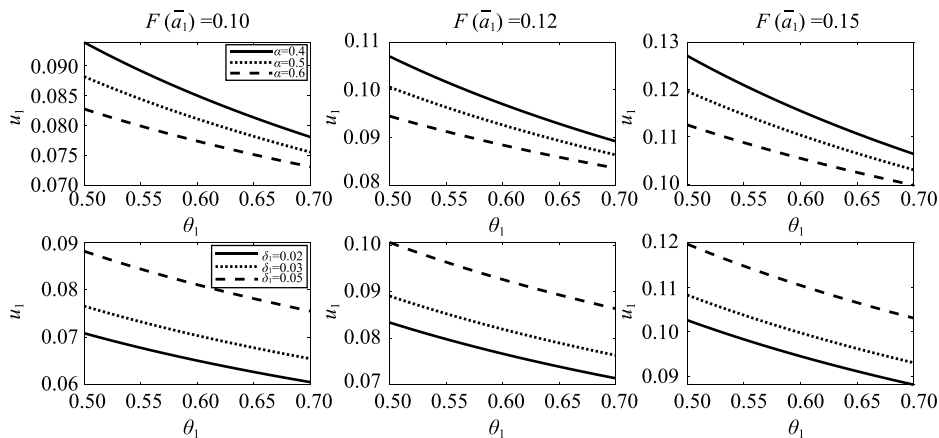


图7 不同匹配弹性与外生离职率下的地区1贝弗里奇曲线变化情况

注:图7中横轴表示地区1劳动力市场紧度 θ_1 ,纵轴表示地区1失业率 u_1 。图中第一行子图表示 $F(\bar{a}_1) = 0.10, 0.12, 0.15$ 时,贝弗里奇曲线随失业匹配弹性 α 变动而变动的情况;图中第二行子图表示 $F(\bar{a}_1) = 0.10, 0.12, 0.15$ 时,贝弗里奇曲线随外生离职率 δ_1 变动而变动的情况。

六、扩展分析与稳健性检验

本文构建了一个包含机器人使用与劳动力流动的搜索与匹配模型,模型推导与脉冲响应分析发现,在短期内,工业自动化替代了劳动,造成一定的就业下滑,也会提高生产率,促使企业开放更多招聘岗位,使得地区内的失业上升与岗位空缺的增加同时存在,进而加剧了当地劳动力市场的扭曲程度。此外,不同地区自动化发展水平的差异推动区域间收入差距扩大,并促使劳动力向自动化水平较高地区聚集。

本部分将进一步开展以下工作:①引入地区-行业异质性分析框架,区分制造业部门与非制造业部门,分析制造业自动化技术的不平衡发展对劳动力在空间以及行业进行配置的影响机制(见附录V图V1至附录V图V3);②考察自动化发展滞后地区的自动化技术进步是否有助于缩小地区间劳动力收入差距,吸引劳动力流入,进而缓解地区间的发展分化(见附录V图V4与附录V图V5);③在基础模型中引入机器人安装时滞与工资刚性等设定,检验结果的稳健性(见附录V图V6至附录V图V9)①。

七、政策含义和研究局限

本文为理解工业自动化对劳动力就业、收入与流动的影响及公共政策制定提供了依据与启示。第一,在短期,工业自动化的发展将加速低端生产率岗位的淘汰,也将推动新岗位的出现。因此,政策制定者应强化就业指导,并通过健全再就业机制提高匹配效率以缓解劳动市场扭曲②。第二,切实保障劳动者合法权益,给予劳动者合理的劳动合同保护,在一定程度上缓解自动化所带来的就业压力③。第三,落后地区应积极进行工业自动化改造,通过自动化改造,落后地区可在一定程度上创造新的就业岗位,吸引劳动力流入,缩小地区间劳动力收入差距,缓解地区发展分化,实现区域的协调发展。

尽管本文在搜寻与匹配视角下,对工业自动化背景下的劳动力市场运行情况以及区域发展状况进行了开创性研究,但是本文的研究仍然存在一定的局限性。第一,本文的研究立足短期,而从长期看,人口老龄化是当前中国经济发展所面临的重要问题,因此劳动总供给长期不会处于固定状态,未来的研究需考虑劳动总供给的动态变化。第二,在现实中,低技能劳动力在一定条件下存在

① 受篇幅限制,请见附录V。

② 指提高求职弹性 α 。

③ 指降低外生离职率 δ_i 。

向高技能劳动力转换的可能性,因此未来的研究应充分考虑这一情况,并需对转换条件进行详细分析。

参考文献

- [1] Acemoglu, D., “Technical Change, Inequality, and the Labor Market”, *Journal of Economic Literature*, 2002, 40(1), 7-72.
- [2] Acemoglu, D., and P. Restrepo, “Artificial Intelligence, Automation and Work”, *NBER Working Paper* No. 24196, 2018a.
- [3] Acemoglu, D., and P. Restrepo, “The Race Between Man and Machine: Implications for Technology for Growth, Factor Shares, and Employment”, *American Economic Review*, 2018b, 108(6), 1488-1542.
- [4] Acemoglu, D., and P. Restrepo, “Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor”, *Journal of Economic Perspectives*, 2019, 33(2), 3-30.
- [5] Acemoglu, D., and P. Restrepo, “Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets”, *Journal of Political Economy*, 2020, 128(6), 2188-2244.
- [6] Aghion, P., and P. Howitt, “Growth and Unemployment”, *The Review of Economic Studies*, 1994, 61(3), 477-494.
- [7] Autor, D. H., “Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation”, *Journal of Economic Perspectives*, 2015, 29(3), 3-30.
- [8] Autor, D. H., F. Levy, and R. J. Murnane, “The Skill Content of Recent Technological Change: An Empirical Exploration”, *Quarterly Journal of Economics*, 2003, 118(4), 1279-1333.
- [9] Baumol, W. J., “Macroeconomics of Unbalanced Growth: The Anatomy of Urban Crisis”, *American Economic Review*, 1967, 57(3), 415-426.
- [10] Bertola, G., T. Boeri, and S. Cazes, “Employment Protection in Industrialized Countries: The Case for New Indicators”, *International Labour Review*, 2000, 139(1), 57-72.
- [11] Bian, X., and G. Zhou, “The Effects of Robots on Internal Migration: Evidence from China”, *Journal of Regional Science*, 2024, 64(3), 840-865.
- [12] Blanchard, O. J., and P. A. Diamond, “The Beveridge Curve”, *Brookings Papers on Economic Activity*, 1989, 1-60.
- [13] 蔡昉, “中国经济改革效应分析——劳动力重新配置的视角”, 《经济研究》, 2017年第7期, 第4—17页。
- [14] 曹章露、王林辉、赵贺, “人工智能技术与劳动力迁出决策——来自全国流动人口动态监测调查的经验证据”, 《北京工商大学学报(社会科学版)》, 2023年第2期, 第1—14页。
- [15] 陈彦斌、林晨、陈小亮, “人工智能、老龄化与经济增长”, 《经济研究》, 2019年第7期, 第47—63页。
- [16] 陈媛媛、张竞、周亚虹, “工业机器人与劳动力的空间配置”, 《经济研究》, 2022年第1期, 第72—188页。
- [17] Davis, S. J., and M. Henrekson, “Tax Effects on Work Activity, Industry Mix and Shadow Economy Size: Evidence from Rich-Country Comparisons”, *Labour Supply and Incentives to Work in Europe*, 2005, p. 44.
- [18] Gao, A., S. Wang, and Q. Zhang, “Impact of Industrial Intelligence on Income Inequality of Urban

- Residents in China”, *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 104: 328-338.
- [19] Goyal, A., and R. Aneja, “Artificial Intelligence and Income Inequality: Do Technological Changes and Worker’s Position Matter?”, *Journal of Public Affairs*, 2020, 20(4): e2326.
- [20] 国务院发展研究中心市场经济研究所课题组、王微、邓郁松、王瑞民、牛三元、赵勇、刘馨, “新一轮技术革命与中国城市化 2020~2050——影响、前景与战略”, 《管理世界》, 2022 年第 11 期, 第 12—28 页。
- [21] 黄卓、陶云清、刘兆达、叶永卫, “智能制造、人力资本升级与企业劳动收入份额”, 《经济学》(季刊), 2024 年第 5 期, 第 1412—1427 页。
- [22] 江曼琦、卢星宇, “流失中的增长: 中小城市人口流动与经济增长收敛研究”, 《现代经济探讨》, 2024 年第 7 期, 第 17—29 页。
- [23] 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”, 《中国工业经济》, 2020 年第 8 期, 第 80—98 页。
- [24] Krause, M. U., and T. A. Lubik, “The (Ir)Relevance of Real Wage Rigidity in the New Keynesian Model with Search Frictions”, *Journal of Monetary Economics*, 2007, 54(3), 706-727.
- [25] Leduc, S., and Z. Liu, “Automation, Bargaining Power, and Labor Market Fluctuations”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2024, 16(4), 311-349.
- [26] Li, S. A., L. Gong, S. Pan, and F. Luo, “Wage and Price Differences, Technology Gap and Labor Flow Dynamics”, *Economic Modelling*, 2020, 88(6), 211-222.
- [27] McGuinness, S., “Overeducation in the Labour Market”, *Journal of Economic Surveys*, 2006, 20(3), 387-418.
- [28] 梅冬州、宋佳馨, “金融业开放与宏观经济去杠杆”, 《中国工业经济》, 2021 年第 10 期, 第 78—97 页。
- [29] Moutos, T., “Technological Change, Inequality and Work Sharing”, *Scottish Journal of Political Economy*, 2006, 53(3), 305-332.
- [30] Oikonomou, M., “Migration, Search and Skill Heterogeneity”, *International Monetary Fund*, 2023.
- [31] Pissarides, C. A., *Equilibrium Unemployment Theory*. MIT Press, 2000.
- [32] 綦建红、付晶晶, “‘机器换人’时代低技能劳动力何去何从? ——基于中国劳动力动态调查数据的检验”, 《人口研究》, 2022 年第 4 期, 第 114—128 页。
- [33] 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”, 《世界经济》, 2022 年第 9 期, 第 3—31 页。
- [34] Robst, J., “Education and Job Match: The Relatedness of College Major and Work”, *Economics of Education Review*, 2007, 26(4), 397-407.
- [35] Rogerson, R., R. Shimer, and R. Wright, “Search-Theoretic Models of the Labor Market: A Survey”, *Journal of Economic Literature*, 2005, 43(4), 959-988.
- [36] Schumpeter, J. A., *Capitalism, Socialism and Democracy*. Oxford: Routledge, 2013.
- [37] 屠年松、郑雅哲、官波, “人工智能的劳动力空间流动效应”, 《财经科学》, 2024 年第 7 期, 第 96—108 页。
- [38] Wang, D., H. Huang, X. Zhao, and F. Fang, “Green Technological Progress, Agricultural Modernization, and Wage Inequality: Lessons from China”, *Review of Development Economics*, 2023, 27(3), 1673-1698.
- [39] 王永钦、董雯, “人机之间: 机器人兴起对中国劳动者收入的影响”, 《世界经济》, 2023 年第 7 期, 第

88—115页。

- [40] 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”,《经济学动态》,2020年第10期,第92—109页。
- [41] *World Trade Report 2017: Trade, Technology and Jobs*. World Trade Organization, 2017, WTO.
- [42] 闫雪凌、朱博楷、马超,“工业机器人使用与制造业就业:来自中国的证据”,《统计研究》,2020年第1期,第74—87页。
- [43] 张君凯、张世伟,“工业机器人应用与劳动力区位选择”,《财经科学》,2024年第2期,第73—90页。
- [44] 张元钊、朱佳宁、张永亮,“人工智能发展与劳动力流动”,《经济学动态》,2025年第1期,第128—145页。
- [45] Zhao, Y., “Labor Migration and Earnings Differences: The Case of Rural Chin”, *Economic Development and Cultural Change*, 1999, 47(4), 767-782.
- [46] 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”,《数量经济技术经济研究》,2022年第1期,第115—131页。

A General Equilibrium Model of Industrial Automation, Income Inequality, and Interregional Labor Mobility

ZHOU Dayong YANG Guang*
(Nankai University)

Abstract: This study develops a dynamic stochastic general equilibrium model featuring robot adoption and labor mobility to explain the labor-market distortions and regional development divergence induced by industrial automation. The results show that, in the short run, industrial automation destroys traditional jobs through a substitution effect that reduces labor demand, while simultaneously creating new employment opportunities via productivity gains, thereby generating labor-market distortions. The uneven regional development of automation reshapes regional specialization, widens interregional income disparities, and drives labor to migrate toward regions with higher levels of automation.

Keywords: industrial automation; income difference; labor migration

JEL Classification: J61, J64, E27

* Corresponding Author: YANG Guang, School of Economics, Nankai University, No. 94 Weijin South Road, Nankai District, Tianjin 300000, China; Tel: 86-22-23501837; E-mail: yangg@nankai.edu.cn.