

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

目录

附录 I 特征事实	2
I.1 2010-2020 年中国各地区工业机器人安装密度	2
I.2 实证检验	2
附录 II 正文未列出的重要一阶条件	7
II.1 中间品制造部门	7
II.2 家庭部门	8
II.3 地区 2 劳动力市场的工资议价过程	8
II.4 所有一阶条件汇总:	9
附录 III 参数校准	12
附录 IV 模型机制分析	14
附录 V 进一步分析	16
V.1 地区一行业差异模型	16
V.2 政策模拟	23
V.3 稳健性检验	25

附录I 特征事实

I.1 2010-2020 年中国各地区工业机器人安装密度

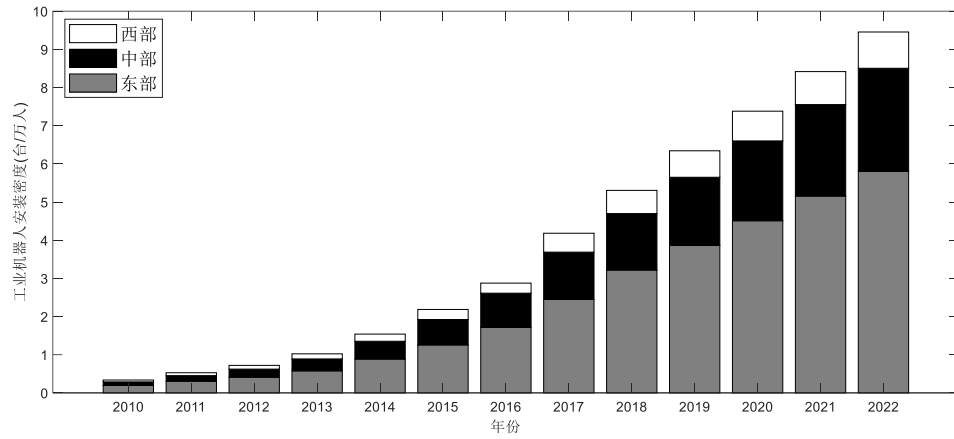


图 I 1 2010-2022 年中国各地区工业机器人安装密度

数据来源：国际工业机器人联合会（IFR）。

注：图 I1 横轴为时间（年份），纵轴表示工业机器人安装密度（台/万人），工业机器人安装密度 = $\sum_j \frac{j \text{ 行业工业机器人使用量}}{j \text{ 行业就业量}} \frac{j \text{ 行业就业量}}{\text{总就业量}}$ ，该数据表示每万名职工中的工业机器人数量。

I.2 实证检验

现有关于工业机器人对收入差距影响的研究，大多采用基尼系数、泰尔指数或劳动收入份额等指标来衡量收入不平等程度。然而，这些传统指标主要反映的是城乡收入差距或劳动报酬在国民收入中的分配状况，难以准确捕捉城市间劳动力收入差距的变化。为弥补这一研究空白，本文创新性地采用人均可支配收入的变异系数作为被解释变量，通过这一指标能够更直接地反映区域间劳动力收入的不平等程度。基于此，本研究重点考察工业自动化发展是否扩大区域间的劳动力收入差距，从而为理解自动化技术影响收入差距的机制提供新的经验证据。

I.2.1 指标构建

被解释变量：为了检验工业机器人的应用是否扩大了区域间的劳动力收入差距。本文在实证回归中参考 Akita and Miyata (2010) 的研究，构建以人均可支配收入为基础的人口加权变异系数来测度地级市的收入差距 (*Income_Inequality*)，这种测度方法既可以弱化人口规模对测度收入差距的偏差，又可以将地理空间分解与收入来源分解统一在一个系统的框架内 (覃成林等, 2011)，可以精准的衡量地级市层面的人均可支配收入与其他地区的偏离程度，进而更好地刻画区域层面的劳动力收入差距，具体如公式 (II) 所示：

$$Income_Inequality_{it} = \sqrt{\frac{\sum_j^n (Income_{it} - Income_{jt})^2 \frac{(L_{it} + L_{jt})/2}{L}}{\sum_j^n Income_{jt} \frac{L_{jt}}{L}}}, \quad (II)$$

其中， $Income_{it}$ 和 $Income_{jt}$ 分别代表第 t 年第 i 个地级市和第 j 个地级市的人均可支配收入， $i, j = 1, 2, 3, \dots, 282$ 。 L_{it} 和 L_{jt} 分别表示第 i 个地级市和第 j 个地级市的人口总数， L 是全国总人口数。该指数

表明第*i*个地级市的人均可支配收入与其他地级市的离差程度,该指数越大,表明该地级市的人均可支配收入与其他地级市相比差异越大,即地区间劳动收入差距加剧。

解释变量:本文参照 Acemoglu and Restrepo (2020a) 的研究思路,首先采用地级市层面的产业就业结构,地级市层面的 16-64 岁劳动力数量,以及行业层面的工业机器人数量构建地级市层面的工业机器人安装密度指标 $Robot_{i,t}$ (赵春明等, 2020; 陈媛媛等, 2022),同时使用 2008 年的行业劳动分布作为加权基准,确保所用权重早于结果变量,保证了因果识别上的合理性。具体如公式 (I2) 所示:

$$Robot_{i,t} = \sum_j \frac{Emp_{i,j,2008}}{\sum_j Emp_{i,j,2008}} \times \frac{Robots_{i,j,t}}{Labor_{i,2008}}, \quad (I2)$$

公式 (I2) 中, $Robot_{i,t}$ 表示 *t* 年 *i* 市工业机器人安装密度 (单位: 台/万人), $Emp_{i,j,2008}$ 表示 2008 年 *i* 市 *j* 行业的就业量, $\sum_j Emp_{i,j,2008}$ 表示 2008 年 *i* 市所有行业的就业量, $Robots_{i,j,t}$ 表示 *t* 年 *i* 市 *j* 行业的机器人使用量, $Labor_{i,2008}$ 表示 2008 年 *i* 市所有 16-64 岁适龄劳动力数量。该指标表示了城市层面各个行业机器人使用密度的加权平均,并使用考察期之前的 2008 年的数据进行权重计算,排除了机器人安装对劳动力就业数量的干扰。为了衡量区域间工业机器人的使用差距,本文仍参考 Akita and Miyata (2010) 的方法构建以工业机器人安装密度为基础的人口加权系数,即机器人使用差异 ($Ro_Inequality_{it}$),具体构建形式如 (I3) 式所示:

$$Ro_Inequality_{it} = \sqrt{\frac{\sum_j^n (Robot_{it} - Robot_{jt})^2 \frac{(L_{it} + L_{jt})/2}{L}}{\sum_j^n Robot_{jt} \frac{L_{jt}}{L}}}, \quad (I3)$$

公式 (I3) 中 $Robot_{it}$ 与 $Robot_{jt}$ 分别代表第 *t* 年第 *i* 个地级市与第 *j* 个地级市的工业机器人安装密度。该指数衡量第 *i* 个地级市的工业机器人安装密度与其他地级市的离散程度,该指数越大,则表明该地级市层面的工业机器人安装密度相较于其他地级市较大。

控制变量:实证回归的控制变量包括以下几项:①产业结构 (*Structure*),为二、三产业增加值与地区生产总值的比值;②产业结构高级化 (*Advance*) 为第三产业增加值与第二产业增加值的比重;③城市经济密度 (*Density*),等于地区生产总值与土地面积的比值;④金融发展水平 (*Finance*) 为年末金融机构存贷款余额与地区生产总值的比值;⑤对外开放程度 (*Open*),等于实际外商直接投资额与地区生产总值的比值;⑥人口密度 (*Population*) 为常住人口数量与土地面积的比重;⑦政府干预程度 (*Market*) 为一般公共预算支出与地区生产总值的比值。

1.2.2 数据来源

考虑到数据的可获得性以及特殊事件的影响,本文样本选取的时间跨度为 2014 年至 2019 年,主要来源有三:①工业机器人数据来源于国际机器人联合会 (IFR) 所报告的工业机器人安装数据。该数据在国家、年度、行业层面提供工业机器人的使用量,并在相关研究中广泛使用 (Acemoglu and Restrepo, 2020a; 魏下海等, 2020; 陈媛媛等, 2022)。根据第二次全国经济普查数据的行业划分标准《国民经济行业分类》,选取农林牧渔业;制造业;电力、热力、燃气及水生产和供应业;建筑业;教育业六大行业的工业机器人使用数据。②分行业就业人数来自于全国经济普查数据的工业企业数据模块。③构建人口变异系数指标所使用的人均可支配收入与其他控制变量数据,来自《中国城市统计年鉴》。

表 11 描述性统计

变量名称	变量符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
收入不平等	<i>Income_Inequality</i>	1692	0.321	0.249	0.172	7.749
机器人使用差异	<i>Ro_Inequality</i>	1692	0.675	0.240	0.392	2.161
产业结构	<i>Structure</i>	1686	0.441	0.092	0.198	0.835
产业结构高级化	<i>Advance</i>	1686	1.110	0.584	0.262	5.169
城市经济密度	<i>Density</i>	1692	0.352	0.807	0.003	13.484
金融发展水平	<i>Finance</i>	1692	2.592	1.263	0.717	21.302
对外开放程度	<i>Open</i>	1674	0.016	0.018	0.000	0.199
人口密度	<i>Population</i>	1692	5.736	0.938	1.374	7.882
政府干预程度	<i>Market</i>	1692	0.210	0.103	0.044	0.916

1.2.3 实证模型与估计结果

为了检验城市间工业机器人使用差异对劳动力工资水平差异的影响，本文构建以下基本回归模型：

$$Income_Inequality_{i,t} = C_0 + \alpha \times Ro_Inequality_{i,t} + \beta \times Controls_{i,t} + \delta_i + \sigma_t + \varepsilon_{i,t} \quad , (I4)$$

公式（I4）中， i 表示城市， t 年份， $Income_Inequality_{i,t}$ 表示区域间劳动力工资水平差异， $Ro_Inequality_{i,t}$ 表示区域间工业机器人使用差异， $Controls_{i,t}$ 表示一系列可能影响区域间劳动力收入水平差异的控制变量。此外， δ_i 表示个体效应， σ_t 表示年份效应， $\varepsilon_{i,t}$ 表示随机误差项，且满足 $E(\varepsilon_{i,t}) = 0$ ， $E(\varepsilon_{i,t}\varepsilon_{i,s}) = 0$ 。

表 12 报告了地区间机器人使用差异对劳动力人均可支配收入差异影响的基准回归结果。本文参考才国伟等（2011）的方法，将中国地级市行政区域划分为 3 个等级。由于中国地级市层面行政区域存在不同的级别，高级别城市凭借自身优势资源，拥有技术、资本与人口规模优势，可能会对结果产生一定程度的干扰，因此在实证检验的过程中，本文通过逐步从样本中剔除不同行政等级的城市，以检验工业机器人使用的差异如何对不同行政等级的城市的劳动力工资水平差异产生影响。

表 12 的估计结果显示，工业机器人的使用差异与区域间劳动力收入差距之间的影响系数在 1% 的水平上显著正相关，以列（1）为例，某地区机器人使用相对于其他地区每提高 1%，该地区人均可支配收入与其他地区的差距会正向增加 0.713，这表明工业机器人的应用显著提高了城市间劳动力收入差距。同时，在分步剔除了享受政策倾斜的直辖市（列（3））和副省级城市（列（4））之后，机器人使用差异的回归系数依旧显著为正，该结果有力证明了机器人使用差异会加剧收入差距这一结论是可信的。具体而言，在工业机器人的使用日益扩大的背景下，不同地区之间由于存在着政策差异和禀赋差异，使得工业机器人的使用在地区间存在着差异，进而影响着劳动力人均可支配收入扩大。潜在的原因在于，某一地区的工业机器人使用规模的扩大将淘汰低生产率的岗位，并保留了高生产效率的岗位，使得剩余岗位的平均劳动生产率水平上升，推动了工资水平的上涨。因此机器人使用水平较高地区的工作岗位平均生产效率相较于其他地区较高，该地区的劳动力的平均收入水平也高于其他地区。

表 12 工业机器人使用差异与区域间人均可支配收入不平等的基准回归

变量	<i>Income Inequality</i> (收入不平等)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
	全样本	全样本	剔除直辖市	剔除直辖市和副省级城市
<i>Ro_Inequality</i> (机器人使用差异)	0.713*** (0.172)	0.684*** (0.146)	0.587*** (0.147)	0.506*** (0.102)
<i>Industry</i> (产业结构)		0.006 (0.030)	-0.010 (0.027)	-0.024 (0.024)
<i>advancer</i> (产业结构高级化)		-0.003 (0.004)	0.000 (0.004)	0.002 (0.003)
<i>density</i> (城市经济密度)		0.011** (0.006)	0.018*** (0.004)	0.012 (0.010)
<i>Finance</i> (金融发展水平)		-0.000 (0.001)	-0.000 (0.001)	-0.000 (0.001)
<i>Open</i> (对外开放程度)		-0.015 (0.053)	-0.030 (0.056)	-0.027 (0.053)
<i>Population</i> (人口密度)		0.012*** (0.004)	0.011*** (0.004)	0.010** (0.004)
<i>Market</i> (政府干预程度)		0.119*** (0.031)	0.115*** (0.030)	0.100*** (0.026)
个体效应	控制	控制	控制	控制
时期效应	控制	控制	控制	控制
<i>N</i>	1692	1668	1644	1555
<i>R</i> ²	0.253	0.297	0.288	0.267

注：***、**、*分别表示 1%、5%和 10%显著性水平，括号内使用聚类稳健标准误。

1.2.4 稳健性检验

在考察机器人使用差异对区域间收入差距的影响时，可能存在双向因果导致的内生性问题：一方面，机器人应用的区域差异可能影响收入分配；另一方面，经济发展水平较高的地区可能更有能力普及机器人技术，从而形成反向因果关系。为解决这一问题，本文采用工具变量法，选取滞后一期的五大工业国（美、日、德、韩、法）机器人使用密度（*Frob*）作为工具变量。这一选择满足工具变量的两个关键条件：一是相关性，作为全球机器人技术领先国家，其机器人产业发展会通过技术溢出效应影响中国的机器人应用；二是外生性，这些国家的机器人使用情况与中国各省份间的收入差距不存在直接联系。实证结果显示，工具变量的第一阶段回归系数显著为正，表明工具变量与内生变量高度相关；第二阶段回归在控制内生性后，机器人使用差异的系数仍显著为正，证实了研究结论的稳健性。这一结果说明，在解决内生性偏误后，机器人使用差异对区域收入差距的扩大效应依然显著存在。

表 13 稳健性检验

变量	(1)	(2)
	<i>Ro_Inequality</i> (机器人使用差异)	<i>Income_Inequality</i> (收入不平等)
<i>Frob</i> (五大国机器人使用差异)	1.001*** (0.012)	
<i>Ro_Inequality</i> (机器人使用差异)		0.766*** (0.053)
<i>Industry</i> (产业结构)	0.016*** (0.004)	0.005 (0.020)
<i>advancer</i> (产业结构高级化)	-0.002*** (0.001)	-0.003 (0.003)
<i>density</i> (城市经济密度)	-0.006*** (0.001)	0.009*** (0.003)
<i>Finance</i> (金融发展水平)	0.000 (0.000)	-0.000 (0.001)
<i>Open</i> (对外开放程度)	0.012 (0.009)	-0.020 (0.039)
<i>Population</i> (人口密度)	-0.004*** (0.001)	0.012*** (0.004)
<i>Market</i> (政府干预程度)	-0.004 (0.003)	0.119*** (0.016)
<i>N</i>	1668	1668
<i>R</i> ²		0.191

附录II 正文未列出的重要一阶条件

II.1 中间品制造部门

$$\max \Pi_{i,t} = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{\lambda_t}{\lambda_0} \left(y_{i,t} - n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} - \kappa_{1,i} v_{i,t} - \kappa_{2,i} A_{i,t} \right). \quad (\text{II1})$$

约束条件:

$$n_{l,i,t+1} = (1 - \delta) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) (n_{l,i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}), \quad (\text{II2})$$

$$A_{i,t+1} = (1 - \rho^a) A_{i,t} + (1 - \delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) (n_{l,i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}). \quad (\text{II3})$$

一阶条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_t}{\partial v_t}: -\kappa_{1,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \mu_{1,i,t+1} (1 - \delta) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) q_{i,t}^v \\ + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \mu_{2,i,t+1} (1 - \delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) q_{i,t}^v = 0 \end{aligned}, \quad (\text{II4})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_t}{\partial n_{l,i,t}}: \mu_{1,i,t} = p_{l,i,t}^n z_t H(\bar{a}_{i,t}) - \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} \\ + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \delta) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) E_t \mu_{1,i,t+1} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \delta) \left(F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) \mu_{2,i,t+1} \end{aligned}, \quad (\text{II5})$$

$$\frac{\partial L_t}{\partial A_{i,t}}: \mu_{2,i,t} = \alpha_a p_{l,i,t}^a z_t (a_{i,t}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a-1} n_{s,i,t}^{1-\alpha_a} - \kappa_{2,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \rho^a) E_t \mu_{2,i,t+1}, \quad (\text{II6})$$

$$w_{s,i,t} = (1 - \alpha_a) z_t (A_{i,t} a_{i,t}^*)^{\alpha_a} n_{s,i,t}^{-\alpha_a}, \quad (\text{II7})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_t}{\partial \bar{a}_{i,t}}: p_{l,i,t}^n z_t n_{l,i,t} \frac{f(\bar{a}_{i,t}) (H(\bar{a}_{i,t}) - \bar{a}_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} - \frac{n_{l,i,t} f(\bar{a}_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} \left(\int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da - w_{l,i,t}(\bar{a}_{i,t}) \right) \\ = \mu_{1,i,t} (1 - \delta) f(\bar{a}_{i,t}) (n_{l,i,t-1} + q_{i,t-1}^v v_{i,t-1}) - \mu_{2,i,t} (1 - \delta) f(\bar{a}_{i,t}) (n_{l,i,t-1} + q_{i,t-1}^v v_{i,t-1}) \end{aligned}, \quad (\text{II8})$$

$\mu_{1,i,t}$ 为约束条件公式 (II2) 的拉格朗日乘子, 表示 i 地区企业额外雇佣一单位劳动企业所能获得的边际收益, $\mu_{2,i,t}$ 表示约束条件公式 (II3) 的拉格朗日乘子, 表示 i 地区企业每额外使用一单位机器人, 企业所能获得的边际收益。将公式 (II4) 带入公式 (II5) 可得:

$$\mu_{1,i,t} = p_{l,i,t}^n z_t H(\bar{a}_{i,t}) - \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da + \frac{\kappa_{1,i}}{q_{i,t}^v}. \quad (\text{II9})$$

结合公式 (II5), 公式 (II6) 带入 (II8) 式, 可得地区 i 中企业自动化水平的最优选择条件, 即公式 (II10)

$$p_{l,i,t}^n z_t \bar{a}_{i,t} - w_{l,i,t}(\bar{a}_{i,t}) + \frac{\kappa_{1,i}}{q_{i,t}^v} = p_{l,i,t}^a z_t a_{i,t}^* - \kappa_{2,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \rho^a) \mu_{2,i,t+1}, \quad (\text{II10})$$

公式 (II10) 表示, 企业在使用工业机器人的临界生产率水平上, 企业新雇佣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。

II.2 家庭部门

$$\max E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[\frac{c_t^{1-\sigma^c}}{1-\sigma^c} - \varpi n_{s,t} \right], \quad (\text{II11})$$

约束条件:

$$\begin{aligned} c_t + d_t + \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-\mu_t)u_t + \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} - 1 \right)^2 \mu_t u_t \\ = Wage_{l,1,t} + Wage_{l,2,t} + Wage_{s,1,t} + Wage_{s,2,t} + b + r_{t-1}d_{t-1} + \Pi_{1,t} + \Pi_{2,t} \end{aligned} \quad (\text{II12})$$

一阶条件:

$$c_t^{-\sigma^c} = \beta r_t E_t c_{t+1}^{-\sigma^c}, \quad (\text{II13})$$

$$\varpi \left(v^n \frac{n_{s,t}}{n_{s,1,t}} \right)^{\frac{1}{\mu^n}} = \lambda_t w_{s,1,t}, \quad (\text{II14})$$

$$\varpi \left((1-v^n) \frac{n_{s,t}}{n_{s,2,t}} \right)^{\frac{1}{\mu^n}} = \lambda_t w_{s,2,t}, \quad (\text{II15})$$

$$n_{s,t} = \left[v_n^{\frac{1}{\mu^n}} (n_{s,1,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu^n}} + (1-v_n)^{\frac{1}{\mu^n}} (n_{s,2,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu^n}} \right]^{\frac{\mu_n}{\mu_n-1}}, \quad (\text{II16})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1,t} = (w_{l,1,t} - b_1 + \xi_{1,t}(1-\mu_t) + \xi_{2,t}\mu_t)\lambda_t \\ + \beta E_t \lambda_{1,t+1} \left((1-q_{1,t}^u(1-\mu_t))(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})) \right. \\ \left. - \beta E_t \lambda_{2,t+1} q_{2,t}^u \mu_t (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1})) \right) \end{aligned} \quad (\text{II17})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{2,t} = (w_{l,2,t} - b_2 + \xi_{1,t}(1-\mu_t) + \xi_{2,t}\mu_t)\lambda_t \\ + \beta E_t \lambda_{2,t+1} (1-q_{2,t}^u \mu_t)(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1})), \\ - \beta E_t \lambda_{1,t+1} q_{1,t}^u (1-\mu_t)(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})) \end{aligned} \quad (\text{II18})$$

$$\begin{aligned} \beta \lambda_{2,t+1} (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1})) q_{2,t}^u - \beta \lambda_{1,t+1} (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})) q_{1,t}^u \\ = \lambda_t (\xi_{2,t} - \xi_{1,t}) \end{aligned} \quad (\text{II19})$$

其中, 公式 (II19) 中

$$\begin{aligned} \xi_{1,t} = \left(\frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} - 1 \right)^2 \right) + \Gamma_h \left(\frac{(1-\mu_t)u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} - 1 \right) \left(\frac{(1-\mu_{t-1})u_t}{(1-\mu_{t-1})u_{t-1}} \right) - \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \Gamma_h \left(\frac{(1-\mu_{t+1})u_{t+1}}{(1-\mu_t)u_t} - 1 \right) \left(\frac{(1-\mu_{t+1})u_{t+1}}{(1-\mu_t)u_t} \right)^2 \\ \xi_{2,t} = \left(\frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} - 1 \right)^2 \right) + \Gamma_h \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} - 1 \right) \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} \right) - \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \Gamma_h \left(\frac{\mu_{t+1} u_{t+1}}{\mu_t u_t} - 1 \right) \left(\frac{\mu_{t+1} u_{t+1}}{\mu_t u_t} \right)^2. \end{aligned}$$

λ_t 表示家庭预算约束的拉格朗日乘子, $\lambda_{1,t}$ 表示在地区 1 工作的劳动力数量累计公式的拉格朗日乘子, $\lambda_{2,t}$ 表示在地区 2 工作的劳动力数量累计公式的拉格朗日乘子。公式 (II13) 为欧拉方程, 公式 (II19) 表示家庭在最优决策下, 低技能劳动力在地区 1 与地区 2 工作的边际净收益相同。

II.3 地区 2 劳动力市场的工资议价过程

地区 2 的工资议价过程基本与地区 1 相一致, 不同之处在于: 如果地区 2 的劳动力在 t 期处于失

业状态, 那么劳动力获得失业保障 b_2 , 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 $\xi_{2,t}(1-\mu_t)$ 。在下一期, 如果失业者在地区 2 寻找到新的工作, 那么劳动力获得就业的价值 $W_{2,t+1}$, 如果在地区 1 寻找到新的工作, 那么劳动力获得就业的价值为 $W_{1,t+1}$, 如果在 $t+1$ 期劳动力失业, 则劳动力获得失业的价值 $U_{2,t+1}$ 。

$$U_{2,t} = b_2 - \xi_{1,t}(1-\mu_t) - \xi_{2,t}\mu_t + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,t}^u\mu_t W_{2,t+1} \\ & + (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))q_{1,t}^u(1-\mu_t)W_{1,t+1} \\ & + (1-(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,t}^u\mu_t)U_{2,t+1} \\ & - (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))q_{1,t}^u(1-\mu_t)U_{1,t+1} \end{aligned} \right]. \quad (\text{II20})$$

同理, 劳动力与企业之间的工资议价过程满足双方的剩余最大化, 劳动力工作时所获得的净剩余为 $W_{2,t}(a_{2,t}) - U_{2,t}$, 企业得到的净剩余为 $J_{2,t}^e(a_{2,t}) - J_{2,t}^v$ 。该最优化问题如 (II21) 表示:

$$\max (W_{2,t}(a_{2,t}) - U_{2,t})^\eta (J_{2,t}^e(a_{2,t}) - J_{2,t}^v)^{1-\eta}. \quad (\text{II21})$$

通过最优化过程得到的最优条件为:

$$W_{2,t}(a_{2,t}) - U_{2,t} = \frac{\eta}{1-\eta} J_{2,t}^e(a_{2,t}). \quad (\text{II22})$$

由此, 同理可得到地区 2 企业的工资决定方程以及企业使用机器人的生产率临界值的决定条件:

$$\begin{aligned} w_{l,2,t} &= (1-\eta)(b_2 - \xi_{2,t}) + \eta p_{2,t}^n z_t H(\bar{a}_{2,t}) + \eta \frac{\kappa_{12}}{q_{2,t}^v} \\ &\quad - \eta \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - q_{2,t}^u)(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))J_{2,t+1}^e, \end{aligned} \quad (\text{II23})$$

$$\bar{a}_{2,t} = \frac{1}{p_{2,t}^n z_t} \left(\begin{aligned} & b_2 - \xi_{2,t} + \left(\frac{\eta q_{2,t}^u - 1}{1-\eta} \right) \frac{\kappa_{12}}{q_{2,t}^v} + \frac{J_{2,t}^a}{1-\eta} \\ & + \frac{\eta}{1-\eta} (1 - q_{2,t}^u) \frac{J_{2,t}^a - \alpha_a p_{2,t}^a z_t (a_{2,t}^*)^{\alpha_a} A_{2,t}^{\alpha_a - 1} n_{s,2,t}^{1-\alpha_a + \kappa_{22}}}{1-\rho^a} (1-\delta)F(\bar{a}_{2,t+1}) \end{aligned} \right). \quad (\text{II24})$$

II.4 所有一阶条件汇总:

$$y_{i,t} = \left[x^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,t}^a)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-x)^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,t}^n)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, \quad i \in \{1,2\} \quad (\text{II25})$$

$$\frac{p_{i,t}^a}{p_{i,t}} = \left(x \frac{y_{i,t}}{y_{i,t}^a} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (\text{II26})$$

$$\frac{p_{i,t}^n}{p_{i,t}} = \left((1-x) \frac{y_{i,t}}{y_{i,t}^n} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (\text{II27})$$

$$u_t = 1 - n_{l,1,t} - n_{l,2,t}, \quad (\text{II28})$$

$$m_{1,t} = e_{1,t}((1-\mu_t)u_t)^\alpha v_{1,t}^{1-\alpha}, \quad (\text{II29})$$

$$m_{2,t} = e_{2,t}(\mu_t u_t)^\alpha v_{2,t}^{1-\alpha}, \quad (\text{II30})$$

$$q_{1,t}^u = \frac{m_{1,t}}{(1-\mu_t)u_t}, \quad (\text{II31})$$

$$q_{2,t}^u = \frac{m_{2,t}}{\mu_t u_t}, \quad (\text{II32})$$

$$q_{1,t}^v = \frac{m_{1,t}}{v_{1,t}}, \quad (\text{II33})$$

$$\theta_{1,t} = \frac{v_{1,t}}{(1-\mu_t)u_t}, \quad (\text{II34})$$

$$\theta_{2,t} = \frac{v_{2,t}}{\mu_t u_t}, \quad (\text{II35})$$

$$y_{i,t}^n = z_t n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} a_{i,t} \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}, \quad (\text{II36})$$

$$y_{i,t}^a = z_t (A_{i,t} a_{i,t}^*)^{\alpha_a} n_{s,i,t}^{1-\alpha_a}, \quad (\text{II37})$$

$$n_{l,i,t+1} = (1-\delta_i) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1})\right) (n_{l,i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}), \quad (\text{II38})$$

$$I_{i,t}^a = (1-\delta_i) F(\bar{a}_{i,t+1}) (n_{i,t} + q_{i,t}^v v_{i,t}), \quad (\text{II39})$$

$$A_{i,t+1} = (1-\rho^a) A_{i,t} + I_{i,t}^a, \quad (\text{II40})$$

$$\begin{aligned} -\kappa_{1,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \mu_{1,i,t+1} (1-\delta) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1})\right) q_{i,t}^v \\ + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \mu_{2,i,t+1} (1-\delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) q_{i,t}^v = 0 \end{aligned}, \quad (\text{II41})$$

$$\begin{aligned} \mu_{1,i,t} = p_{i,t}^n z_t H(\bar{a}_{i,t}) - \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} \\ + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1-\delta) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1})\right) E_t \mu_{1,i,t+1} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1-\delta) \left(F(\bar{a}_{i,t+1})\right) \mu_{2,i,t+1} \end{aligned}, \quad (\text{II42})$$

$$\mu_{2,i,t} = \alpha_a p_{i,t}^a z_t (a_{i,t}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a-1} n_{s,i,t}^{1-\alpha_a} - \kappa_{2,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1-\rho^a) E_t \mu_{2,i,t+1}, \quad (\text{II43})$$

$$w_{s,i,t} = (1-\alpha_a) z_t (A_{i,t} a_{i,t}^*)^{\alpha_a} n_{s,i,t}^{-\alpha_a}, \quad (\text{II44})$$

$$\begin{aligned} p_{i,t}^n z_t n_{l,i,t} \frac{f(\bar{a}_{i,t})(H(\bar{a}_{i,t})-\bar{a}_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} - \frac{n_{l,i,t} f(\bar{a}_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} \left(\int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da - w_{l,i,t}(\bar{a}_{i,t}) \right) \\ = \mu_{1,i,t} (1-\delta) f(\bar{a}_{i,t}) (n_{l,i,t-1} + q_{i,t-1}^v v_{i,t-1}) - \mu_{2,i,t} (1-\delta) f(\bar{a}_{i,t}) (n_{l,i,t-1} + q_{i,t-1}^v v_{i,t-1}) \end{aligned}, \quad (\text{II45})$$

$$c_t^{-\sigma^c} = \beta r_t E_t c_{t+1}^{-\sigma^c}, \quad (\text{II46})$$

$$\varpi \left(v^n \frac{n_{s,t}}{n_{s,1,t}} \right)^{\frac{1}{\mu^n}} = \lambda_t w_{s,1,t}, \quad (\text{II47})$$

$$\varpi \left((1-v^n) \frac{n_{s,t}}{n_{s,2,t}} \right)^{\frac{1}{\mu^n}} = \lambda_t w_{s,2,t}, \quad (\text{II48})$$

$$n_{s,t} = \left[v_n^{\frac{1}{\mu_n}} (n_{s,1,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu_n}} + (1-v_n)^{\frac{1}{\mu_n}} (n_{s,2,t})^{\frac{\mu_n-1}{\mu_n}} \right]^{\frac{\mu_n}{\mu_n-1}}, \quad (\text{II49})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{1,t} = & (w_{l,1,t} - b_1 + \xi_{1,t}(1 - \mu_t) + \xi_{2,t}\mu_t)\lambda_t \\ & + \beta E_t \lambda_{1,t+1} (1 - q_{1,t}^u(1 - \mu_t))(1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{1,t+1})), \\ & - \beta E_t \lambda_{2,t+1} q_{2,t}^u \mu_t (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{2,t+1})) \end{aligned} \quad (\text{II50})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{2,t} = & (w_{l,2,t} - b_2 + \xi_{1,t}(1 - \mu_t) + \xi_{2,t}\mu_t)\lambda_t \\ & + \beta E_t \lambda_{2,t+1} (1 - q_{2,t}^u \mu_t)(1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{2,t+1})), \\ & - \beta E_t \lambda_{1,t+1} q_{1,t}^u (1 - \mu_t)(1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{1,t+1})) \end{aligned} \quad (\text{II51})$$

$$\begin{aligned} & \beta \lambda_{2,t+1} (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{2,t+1})) q_{2,t}^u - \beta \lambda_{1,t+1} (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{1,t+1})) q_{1,t}^u, \\ & = \lambda_t (\xi_{2,t} - \xi_{1,t}) \end{aligned} \quad (\text{II52})$$

$$\bar{a}_{i,t} = \frac{1}{p_{i,t}^n z_t} \left(\begin{aligned} & b_i - \xi_{i,t} + \left(\frac{\eta q_{i,t}^u - 1}{1 - \eta} \right) \frac{\kappa_{1,i}}{q_{1,t}^v} + \frac{J_{i,t}^a}{1 - \eta} \\ & + \frac{\eta}{1 - \eta} (1 - q_{i,t}^u) \frac{J_{i,t}^a - \alpha_a p_{i,t}^a z_t (a_{i,t}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a - 1} n_{s,i,t}^{1 - \alpha_a} + \kappa_{2,i}}{1 - \rho^a} (1 - \delta_i) F(\bar{a}_{i,t+1}) \end{aligned} \right) \quad (\text{II53})$$

$$\begin{aligned} & c_t + \kappa_{11} v_{1,t} + \kappa_{12} A_{1,t} + \kappa_{21} v_{2,t} + \kappa_{22} A_{2,t} \\ & + \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1 - \mu_t) u_t}{(1 - \mu_{t-1}) u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1 - \mu_t) u_t + \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t u_t}{\mu_{t-1} u_{t-1}} - 1 \right)^2 \mu_t u_t = y_t, \end{aligned} \quad (\text{II54})$$

$$y_t = \left[\varphi^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{1,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1 - \varphi)^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{2,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}}, \quad (\text{II55})$$

$$\frac{p_{1,t}}{p_t} = \left(\varphi \frac{y_t}{y_{1,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (\text{II56})$$

$$\frac{p_{2,t}}{p_t} = \left((1 - \varphi) \frac{y_t}{y_{2,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (\text{II57})$$

附录III 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 $\{\beta, x, \alpha, \sigma, \sigma^c, \delta_1, \delta_2, \Gamma_h, \eta, \rho^o, \epsilon, \alpha_a\}$ 。第二类参数由模型均衡条件内生决定 $\{\kappa_{11}, \kappa_{12}, b_1, b_2, \kappa_{21}, \kappa_{22}, v_n, \varpi, \mu_n\}$ 。

当需对第一类参数进行校准时, 本文采取了参考过去经典文献的方法, 即外部校准法。对于跨期贴现因子 β , 已有文献的校准区间为 0.95-0.99, 由于本模型一期刻画一个季度的时间, 文章参考梅冬州和宋佳馨 (2021) 的研究, 将其设定为 0.99。关于工业机器人所生产出产品的占总产品的权重 x , 范长煜和邓韵雪 (2022) 使用广东省制造业企业调查数据研究发现, 将近 30%的劳动力有可能被工业机器人所替代, 因此本文假设 x 为 0.30, 即工业机器人所承担的任务占生产总任务的比重为 0.30。对于寻找工作的劳动力与新增就业之间的弹性 α , 本文参考 Krause and Lubik (2007) 的研究将其取值为 0.40。对于劳动所生产的产品与工业机器人生产的产品之间的替代弹性 σ , 本文参考 Eden and Gaggi (2018) 的研究将其取值为 3。关于家庭消费的风险厌恶系数, 文章参考 Krause and Lubik (2007) 的研究, 将家庭风险厌恶系数 σ^c 设定为 2。关于外生离职率 δ_1 与 δ_2 , 参考一般劳动力的搜索与匹配模型的研究, 将其值设定为 0.05。关于劳动力迁移的摩擦成本系数 Γ_h , 参考 Oikonomou (2024) 的研究, 文章将劳动力迁移的摩擦成本系数 Γ_h 设为 6.50。关于劳动力与企业之间议价能力参数 η , 文章参考 Oikonomou (2024) 的研究, 将该参数赋值为 0.50。关于工业机器人存量的季度折旧率 ρ^a , 文章参考 Leduc and Liu (2024) 的研究将该参数赋值为 0.03, 对应工业机器人存量的年度折旧率为 12%。关于两地区产品替代弹性 ϵ , 文章参考朱军和许志伟 (2018) 的研究, 将其赋值为 2。关于机器人对自动化产品的产出弹性 α_a , 文章参考 Leduc and Liu (2024) 的研究, 将机器人对产出的贡献比重设置为 0.32。

对第二类参数值进行校准时, 首先对模型中的关键变量的稳态值赋值, 随后利用模型中与之相关的均衡条件, 推导得到部分参数的稳态值。Liu (2013) 的研究使用中国劳动统计年鉴的数据测算了中国失业劳动力就职率与企业招聘成功率分别为 0.50 与 0.30, 因此文章参考该研究对两地区失业劳动力求职成功率的稳态值 $\bar{q}_{1,t}^u, \bar{q}_{2,t}^u$ 取值为 0.30, 对两地区企业招聘成功的概率的稳态值 $\bar{q}_{1,t}^v, \bar{q}_{2,t}^v$ 取值为 0.50。Leduc and Liu (2024) 的研究推算出工业机器人的应用概率为 0.10, 因此文章参考该研究将地区 1 的工业机器人的应用概率 $F(\bar{a}_1)$ 设定为 0.10, 地区 2 则因为相较于地区 1 在工业机器人的使用过程中处于落后地位, 因此文章将地区 2 的工业机器人的应用概率设定为 0.08, 由此可推算地区 1 与地区 2 的企业的招聘成本参数 κ_{11}, κ_{12} 均为 0.05, 而工业机器人使用成本参数 κ_{21}, κ_{22} 分别为 0.04 与 0.05。关于地区 1 高技能劳动占全体高技能劳动的比重 v_n , 可由内部稳态条件推出, 该值取为 0.50。关于劳动的负效用权重 ϖ , 本文通过将高技能劳动总量设定为 1, 将其校准为 0.27。根据一般 RBC 模型关于工资与劳动之间关系的设定, 工资上涨会使得家庭愿意提供更多劳动, 而非由于财富增加而不愿劳动, 因此不同地区高技能劳动之间的替代弹性 μ_n 取值受公式 (IV8)

①中 $\alpha\mu_n - 1 > 0$ 的制约, 本文将该值取为 11, 意味着高技能劳动在两地区间有较高的流动性。

① 详情请见附录 IV。

表 III 1 参数校准表

β	跨期贴现因子	0.99
x	机器人产品权重	0.30
α	求职弹性	0.40
σ	中间品替代弹性	3
σ^c	家庭风险厌恶系数	2
δ_1	地区 1 外生离职率	0.05
δ_2	地区 2 外生离职率	0.05
Γ_h	劳动力迁移的摩擦成本系数	6.50
η	劳动力与企业之间议价能力	0.50
ρ^o	工业机器人存量的年度折旧率	0.12
ϵ	两地区产品替代弹性	2
α_a	机器人对自动化产品的产出弹性	0.32
κ_{11}	地区 1 招聘成本参数	0.05
κ_{12}	地区 2 招聘成本参数	0.05
b_1	地区 1 失业补贴参数	0.96
b_2	地区 2 失业补贴参数	0.96
κ_{21}	地区 1 工业机器人使用成本参数	0.04
κ_{22}	地区 2 工业机器人使用成本参数	0.05
v_n	地区 1 高技能劳动占全体高技能劳动的比重	0.50
$\bar{\omega}$	劳动的负效用权重	0.27
μ_n	不同地区高技能劳动之间的替代弹性	11

附录IV 模型机制分析

1. 地区*i*机器人生产率的进步提升了地区*i*机器人被应用的概率

在企业的生产决策中,是否采用机器人替代人工取决于企业对两者生产率的相对权衡。公式(32)揭示了临界劳动生产率 $\bar{a}_{i,t}$ 与机器人生产率 $a_{i,t}^*$ 之间的内生关系。通过对公式(32)进行对数线性化,并进行求导可得 $\partial \hat{a}_{i,t} / \partial \hat{a}_{i,t}^* > 0$,说明机器人生产率的提高增加了机器人被应用的可能性^①。

$$\frac{\partial \hat{a}_{i,t}}{\partial \hat{a}_{i,t}^*} = \frac{\partial \hat{a}_{i,t}}{\partial \hat{J}_{i,t}^a} \frac{\partial \hat{J}_{i,t}^a}{\partial \hat{a}_{i,t}^*} = \frac{\alpha_a J_{i,t}^a}{(1-\eta) p_i^n z \bar{a}_i} > 0. \quad (\text{IV1})$$

2. 地区*i*机器人生产率的提升带动地区*i*低技能劳动工资水平的增长

由于不同的低技能岗位之间的生产率存在异质性,且服从对数正态分布,当低生产率要求的岗位逐渐被市场淘汰时,经济中保留的岗位将普遍具有更高的生产率要求,这一机制推动了整体平均工资水平的上升。公式(31)从理论上刻画了本模型中低技能劳动力工资的决定过程。通过对公式(31)进行对数线性化后求导,可发现临界劳动生产率对低技能劳动力工资的导数大于0,意味着临界生产率的提升促进了低技能劳动力工资的增长。

$$\frac{d\bar{w}_{l,i,t}}{d\bar{a}_{i,t}} = \frac{\eta p_i^n z H'(\bar{a}_i) \bar{a}_i}{w_{l,i}} > 0, \quad (\text{IV2})$$

$$H'(\bar{a}_i) = \frac{\int_{\bar{a}_i}^{\infty} (a_i - \bar{a}_i) f(\bar{a}_i) f(a_i) da_i}{(1-F(\bar{a}_i))^2} > 0. \quad (\text{IV3})$$

3. 地区*i*的自动化概率的提升降低了地区*i*的就业水平,增加了新岗位的创建。

公式(21)表示了地区1低技能劳动力就业量的动态变化过程,通过对该公式关于地区1自动化概率 $F(\bar{a}_{1,t})$ 进行对数线性化后求导可得公式(IV4),该导数小于0,说明自动化程度的提升会降低企业对低技能劳动的使用量。地区2的分析过程与地区1相类似,此处不再赘述。

$$\frac{d\hat{n}_{l,i,t}}{d\hat{F}(\bar{a}_{i,t})} = \frac{-(1-\delta_i)(n_{l,i,t} + q_i^v v_i) f(\bar{a}_i) \bar{a}_i}{n_{l,i}} < 0. \quad (\text{IV4})$$

在本文中,岗位创造的决定条件由公式(26)决定,由于 $J_{i,t}^p = 0$,因此可将公式(26)改写为公式(IV5),公式(IV5)等号右边(RHS)表示岗位空缺在未来贴现收益,如果岗位空缺的未来收益提高,厂商有动力开放更多的岗位。

$$\frac{\kappa_{1,i}}{q_{i,t}^v} = \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[(1-\delta_i) \left(1 - F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) J_{i,t+1}^e + (1-\delta_i) F(\bar{a}_{i,t+1}) J_{i,t+1}^a \right]. \quad (\text{IV5})$$

结合公式(23)、(24)以及(32),对该式进行对数线性化进行求导可得公式

$$\frac{\partial \widehat{RHS}_{i,t}}{\partial \hat{a}_{i,t+1}^*} = \frac{\beta(1-\delta_i) F(\bar{a}_i) \alpha_a^2 p^a z (a^*)^{\alpha_a} A^{\alpha_a-1} n_s^{1-\alpha_a}}{RHS} > 0. \quad (\text{IV6})$$

公式(IV6)可说明自动化生产率 $\hat{a}_{i,t+1}^*$ 可提高岗位空缺的预期收益,提高新开放的岗位数量。

4. 地区*i*机器人生产率的提升带动了地区*i*高技能劳动力工资水平的上涨,并吸引高技能劳动流入。

公式(25)为企业对高技能劳动力的需求函数,该公式表明高技能劳动力的工资等于其边际产

^① 对数线性化后 $\hat{x}_t$ 表示变量 x_t 对稳态的对数偏离, $\bar{x}$ 表示变量 x_t 的稳态。

出。通过对公式 (25) 关于机器人生产率 $a_{i,t}^*$ 进行求导可得公式 (IV7), 该公式表明机器人生产率的提升能够通过互补效应显著提高了高技能劳动力的工资水平。

$$\frac{\partial \hat{w}_{s,i,t}}{\partial \hat{a}_{i,t}^*} = \frac{(1-\alpha_a)\alpha_a p_i^a z(a_i^*)^{\alpha_a} A_i^{\alpha_a} n_{s,i}^{-\alpha_a}}{w_{s,i}} > 0. \quad (\text{IV7})$$

对高技能劳动力而言, 通过联立家庭劳动供给与企业劳动需求函数, 可得均衡条件下高技能劳动的解析式。

$$n_{s,i,t} = \left(\frac{(1-\alpha_0)p_{i,t}^a z_t(a_{i,t}^* A_{i,t})^{\alpha_a} \lambda_t}{\varpi(v^n)^{1/\mu_n} n_{s,t}^{1/\mu_n}} \right)^{\frac{\mu_n}{\alpha\mu_n-1}}. \quad (\text{IV8})$$

对公式 (IV8) 进行对数线性化并进行全微分可得公式 (IV9):

$$\frac{\partial \hat{n}_{s,i,t}}{\partial \hat{a}_{i,t}^*} = \frac{\alpha_a \mu_n}{\alpha \mu_n - 1} > 0, \quad (\text{IV9})$$

公式 (IV9) 说明, 地区 i 的高技能劳动力就业量 $n_{s,i,t}$ 随着机器人生产率 $a_{i,t}^*$ 的增长而增长。

5. 地区 i 的低技能劳动力工资水平上升促进了低技能劳动力的流入

公式 (31) 决定了地区 1 低技能劳动力的工资。通过对公式 (31) 关于流向地区 1 的失业劳动力比例 $(1-\mu)$ 与低技能劳动力工资 $w_{l,i,t}$ 进行对数线性化并进行全微分可得公式 (IV10), 该导数大于 0, 说明工资的增长可吸引劳动力流入地区 1。地区 2 的分析过程与地区 1 相类似, 此处不再赘述。

$$\frac{\partial (1-\mu_t)}{\partial \hat{w}_{l,1,t}} = \frac{w_{l,1}}{\alpha((1-\mu)u)^{-\alpha} v_1^{\alpha+(1-\alpha)\beta\eta(1-\delta)(1-F(\bar{a}_1))((1-\mu)u)^{\alpha-1} v_1^{1-\alpha} j_1^e}} > 0 \quad (\text{IV10})$$

附录V 进一步分析

V.1 地区—行业差异模型

在前文的基准模型中,为清晰阐明自动化技术对劳动力市场的影响机制,本文构建了一个包含两地区,且两地区仅有单一行业的简化模型。然而,现实经济中自动化技术的影响具有多维性,即自动化技术不仅会驱动劳动力在区域间进行重新配置,还会引发劳动力的跨行业流动(陈媛媛等,2022;綦建红和付晶晶,2022)。为了更全面地捕捉这一特征,本研究对基准模型进行了重要拓展——在每个地区引入两个异质性生产部门:一是采用机器人与劳动力进行生产的制造业部门,二是仅依赖劳动力要素进行生产的非制造业部门。这一扩展使本文能够同时考察自动化冲击下劳动力的行业选择过程。具体的模型构建过程如下

V.1.1 最终产品部门

两个地区*i*的最终产品 $y_{i,t}$ 分别由制造业产品 $y_{i,m,t}$ 与非制造业产品 $y_{i,n,t}$ 所构成,最终产品的生产函数为 CES 函数,具体形式如公式(V1)所表示:

$$y_{i,t} = \left[x^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,m,t})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-x)^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,n,t})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, i \in \{1,2\}, \quad (V1)$$

其中在公式(V1)中, x 表示地区*i*制造业产品的占地区*i*总产品的权重, σ 表示两种产品之间的替代弹性。经过最优化求解,可得到制造业产品与非制造业产品的需求函数如公式(V2)与公式(V3)所示:

$$\frac{p_{i,m,t}}{p_{i,t}} = \left(x \frac{y_{i,t}}{y_{i,m,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (V2)$$

$$\frac{p_{i,n,t}}{p_{i,t}} = \left((1-x) \frac{y_{i,t}}{y_{i,n,t}} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (V3)$$

$p_{i,t}$ 表示地区*i*最终产品的价格, $p_{i,m,t}$ 为制造业产品的价格, $p_{i,n,t}$ 为非制造业产品的价格。

V.1.2 劳动市场

在劳动市场中,劳动力在每期可能处于以下几种状态:在地区 1 的制造业企业工作,在地区 1 的非制造业企业工作,在地区 2 的制造业企业工作,在地区 2 的非制造业企业工作,处于失业状态。假设劳动总供给为 1,则模型中失业劳动力的数量由公式(V4)表示

$$u_t = 1 - n_{1,m,t} - n_{2,m,t} - n_{1,n,t} - n_{2,n,t}, \quad (V4)$$

u_t 表示*t*期处于失业状态的劳动力数量, $n_{1,m,t}$ 表示*t*期在地区 1 制造业就业的劳动力数量, $n_{2,m,t}$ 表示*t*期在地区 2 制造业企业就业的劳动力数量, $n_{1,n,t}$ 表示*t*期在地区 1 非制造业企业就业的劳动力数量, $n_{2,n,t}$ 表示*t*期在地区 2 非制造业企业就业的劳动力数量。在每个地区的劳动力市场中,岗位空缺与寻找工作的劳动力进行着匹配,该匹配过程可用柯布—道格拉斯函数表示:

$$m_{1,m,t} = e_{1,m,t} \left((1 - \mu_t)(1 - s_{1,t})u_t \right)^{\alpha_{H,1}} v_{1,m,t}^{1-\alpha_{H,1}}, \quad (V5)$$

$$m_{1,n,t} = e_{1,n,t} \left((1 - \mu_t) s_{1,t} u_t \right)^{\alpha_{L,1}} v_{1,n,t}^{1-\alpha_{L,1}}, \quad (\text{V6})$$

$$m_{2,m,t} = e_{2,m,t} (\mu_t (1 - s_{2,t}) u_t)^{\alpha_{H,2}} v_{2,m,t}^{1-\alpha_{H,2}}, \quad (\text{V7})$$

$$m_{2,n,t} = e_{2,n,t} (\mu_t s_{2,t} u_t)^{\alpha_{L,2}} v_{2,n,t}^{1-\alpha_{L,2}}, \quad (\text{V8})$$

$m_{i,k,t}$ 表示 t 期两地区的制造业企业与非制造业企业的新增就业数量, μ_t 表示 t 期选择前往地区 2 寻找工作的失业者占总失业者数量的比例, $s_{1,t}$ 与 $s_{2,t}$ 分别表示两地区前往非制造业企业工作的失业者数量占流入该地区劳动者数量的比例, $(1 - \mu_t)(1 - s_{1,t})u_t$ 表示前往地区 1 制造业企业寻找工作的失业者数量, $(1 - \mu_t)s_{1,t}u_t$ 表示前往地区 1 非制造业企业寻找工作的失业者数量, $\mu_t(1 - s_{2,t})u_t$ 表示前往地区 2 制造业企业寻找工作的劳动者数量, $\mu_t s_{2,t}u_t$ 分别表示前往地区 2 非制造业企业寻找工作的劳动者数量, u_t 表示失业者数量, $v_{i,k,t}$ 表示企业所发布的空缺岗位, $\alpha_{H,1}$, $\alpha_{L,1}$, $\alpha_{H,2}$, $\alpha_{L,2}$ 表示寻找工作的劳动力与新增劳动力之间的弹性。 $i \in \{1,2\}, k \in \{m,n\}$ 。

$$q_{1,m,t}^u = \frac{m_{1,m,t}}{(1-\mu_t)(1-s_{1,t})u_t}, \quad q_{2,m,t}^u = \frac{m_{2,m,t}}{\mu_t(1-s_{2,t})u_t}, \quad q_{1,n,t}^u = \frac{m_{1,n,t}}{(1-\mu_t)s_{1,t}u_t}, \quad q_{2,n,t}^u = \frac{m_{2,n,t}}{\mu_t s_{2,t}u_t}, \quad (\text{V9})$$

$$q_{1,m,t}^v = \frac{m_{1,m,t}}{v_{1,m,t}}, \quad q_{2,m,t}^v = \frac{m_{2,m,t}}{v_{2,m,t}}, \quad q_{1,n,t}^v = \frac{m_{1,n,t}}{v_{1,n,t}}, \quad q_{2,n,t}^v = \frac{m_{2,n,t}}{v_{2,n,t}}. \quad (\text{V10})$$

市场紧度 $\theta_{i,k,t}$ 则被定义为:

$$\theta_{1,m,t} = \frac{v_{1,m,t}}{(1-\mu_t)(1-s_{1,t})u_t}, \quad \theta_{2,m,t} = \frac{v_{2,m,t}}{\mu_t(1-s_{2,t})u_t}, \quad \theta_{1,n,t} = \frac{v_{1,n,t}}{(1-\mu_t)s_{1,t}u_t}, \quad \theta_{2,n,t} = \frac{v_{2,n,t}}{\mu_t s_{2,t}u_t}. \quad (\text{V11})$$

V.1.3 家庭部门

根据经典 RBC 模型对代表性家庭的刻画, 代表性家庭向地区 1 与地区 2 的制造业企业与非制造业企业供给劳动, 获得劳动收入, 同时进行消费与储蓄。

$$\max E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[\frac{c_t^{1-\sigma^c} - 1}{1-\sigma^c} \right], \quad (\text{V12})$$

E_0 表示期望因子, β 表示贴现率, c_t 为消费, σ^c 为 CRRA 家庭风险偏好因子。家庭面临的预算约束式为公式 (V13):

$$c_t + d_t + \sum_{i=1}^2 \sum_{k \in \{m,n\}} q_{i,k,t} = \sum_{i=1}^2 \sum_{k \in \{m,n\}} \text{Wage}_{i,k,t} + b + r_{t-1} d_{t-1} + \sum_{i=1}^2 \sum_{k \in \{m,n\}} \Pi_{i,k,t}, \quad (\text{V13}) \textcircled{1}$$

d_t 表示家庭持有的储蓄, $q_{i,k,t}$ 表示失业劳动力前往不同地区与行业寻找工作所要付出的调整成本, b 为总失业补贴, Γ_h 为调整成本的系数, $\text{Wage}_{i,k,t}$ 表示不同地区与行业劳动力的劳动收入, 地区 i 制

造业企业劳动力的收入为 $\text{Wage}_{i,m,t} = n_{i,m,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{i,m,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} - b_{i,m} n_{i,m,t}$, $b_{i,m}$ 表示地区 i

制造业劳动力失业补贴的系数, $w_{i,m,t} = \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{i,m,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}$ 表示地区 i 制造业的平均工资, 从该式可以看出, 制造业平均工资 $w_{i,m,t}$ 随企业使用工业机器人的临界生产率 $\bar{a}_{i,t}$ 的上升而上升, 非制造业劳动力的收入 $\text{Wage}_{i,n,t} = w_{i,n,t} n_{i,n,t} - b_{i,n} n_{i,n,t}$, $b_{i,n}$ 表示地区 i 非制造业劳动力失业补贴的系数, 非

$\textcircled{1}$ $q_{1,m,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)(1-s_{1,t})u_t}{(1-\mu_{t-1})(1-s_{1,t})u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-\mu_t)(1-s_{1,t})u_t$, $q_{1,n,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{(1-\mu_t)s_{1,t}u_t}{(1-\mu_{t-1})s_{1,t-1}u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-\mu_t)s_{1,t}u_t$
 $q_{2,m,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{\mu_t(1-s_{2,t})u_t}{\mu_{t-1}(1-s_{2,t-1})u_{t-1}} - 1 \right)^2 (1-s_{2,t})u_t$, $q_{2,n,t} = \frac{\Gamma_h}{2} \left(\frac{s_{2,t}u_t}{s_{2,t-1}u_{t-1}} - 1 \right)^2 s_{2,t}u_t$

制造业劳动力工资为 $w_{i,n,t}$ 。 r_{t-1} 表示 $t-1$ 期的储蓄利率, $\Pi_{i,k,t}$ 表示家庭从地区 1 和地区 2 所获得企业的利润。 t 期在地区 1 制造业就业的劳动力数量 $n_{1,m,t}$ 由 $t-1$ 期在地区 1 制造业企业继续工作的劳动力 $n_{1,m,t-1}$ 与在地区 1 制造业企业新寻找到工作的劳动力 $q_{1,m,t-1}^u(1-\mu_{t-1})(1-s_{1,t-1})u_{t-1}$ 组成。

$$n_{1,m,t} = (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t}))(n_{1,m,t-1} + q_{1,m,t-1}^u(1-\mu_{t-1})(1-s_{1,t-1})u_{t-1}). \quad (V14)$$

另外, t 期在地区 2 制造业企业工作的劳动力数量 $n_{2,m,t}$ 由 $t-1$ 期在地区 2 制造业企业继续工作的劳动力 $n_{2,m,t-1}$ 与在地区 2 制造业企业新寻找到工作的劳动力 $q_{2,m,t-1}^u\mu_{t-1}(1-s_{2,t-1})u_{t-1}$ 组成, 表达形式如下:

$$n_{2,m,t} = (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t}))(n_{2,m,t-1} + q_{2,m,t-1}^u\mu_{t-1}(1-s_{2,t-1})u_{t-1}). \quad (V15)$$

家庭在预算约束 (V13) 以及地区 1 与地区 2 的制造业企业与非制造业企业劳动力数量演化公式约束下, 选择最优消费 c_t , 最优储蓄 d_t , 最优迁移率 μ_t 与行业转移率 $s_{1,t}$, $s_{2,t}$, 最优劳动供给量 $n_{i,k,t}$, 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。

V.1.4 中间产品部门

1. 制造业企业

制造业企业所生产的产品 $y_{i,m,t}$ 分别由劳动所生产出的产品 $y_{i,m,t}^n$ 与机器人所生产的产品 $y_{i,m,t}^a$ 所构成, 生产函数为 CES 函数

$$y_{i,m,t} = \left[\omega^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,m,t}^a)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\omega)^{\frac{1}{\sigma}} (y_{i,m,t}^n)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, i \in \{1,2\}, \quad (V16)$$

ω 表示机器人所生产出产品的占总产品的权重, σ 表示两种产品之间的替代弹性。

经过最优化求解, 可得到对劳动产品与机器人产品的需求如公式 (V17) 与公式 (V18) 所示:

$$\frac{p_{i,m,t}^a}{p_{i,m,t}} = \left(\omega \frac{y_{i,m,t}}{y_{i,m,t}^a} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (V17)$$

$$\frac{p_{i,m,t}^n}{p_{i,m,t}} = \left((1-\omega) \frac{y_{i,m,t}}{y_{i,m,t}^n} \right)^{\frac{1}{\sigma}}, \quad (V18)$$

$p_{i,m,t}$ 表示制造业最终产品的价格, $p_{i,m,t}^a$ 为机器人生产的产品的价格, $p_{i,m,t}^n$ 为劳动所生产的产品的价格。

假设企业使用机器人和劳动生产两种不同的产品分别为 $y_{j,i,m,t}^a$ 与 $y_{j,i,m,t}^n$, $i \in \{1,2\}$, 且不同劳动岗位 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, $a_{i,t} \sim LN(0, \sigma_{i,a}^2)$ 。企业在进行自动化决策时存在临界劳动生产率 $\bar{a}_{i,t}$, 当企业中岗位 j 的劳动生产率 $a_{j,i,t}$ 大于临界劳动生产率 $\bar{a}_{i,t}$, 此时劳动力在生产效率方面更占优势, 企业选择继续使用劳动 $n_{i,m,t}$ 进行生产。反之, 当劳动生产率 $a_{j,i,t}$ 小于工业机器人的生产率 $\bar{a}_{i,t}$ 时, 企业选择使用工业机器人 $A_{i,t}$ 代替劳动进行生产。公式 (V19) 表示企业的生产函数。

$$\begin{cases} y_{j,i,m,t}^n = z_{i,t} n_{j,i,m,t} a_{j,i,t}, & a_{j,i,t} > \bar{a}_{i,t} \\ y_{j,i,m,t}^a = z_{i,t} A_{j,i,t} a_{i,t}^*, & a_{j,i,t} \leq \bar{a}_{i,t} \end{cases}. \quad (V19)$$

经加总后, 制造业企业中由劳动所生产产品的生产函数为:

$$y_{i,m,t}^n = z_t n_{i,m,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} a_{i,t} \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}. \quad (V20)$$

制造业企业中由机器人生产的产品的生产函数为:

$$y_{i,m,t}^a = z_t A_{i,t} \int_0^{\bar{a}_{i,t}} a_{i,t}^* \frac{f(a_{i,t})}{F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t}, \quad (V21)$$

$F(a_{i,t})$ 为随机变量 $a_{i,t}$ 的累积密度函数, $F(\bar{a}_{i,t}) = \int_0^{\bar{a}_{i,t}} dF(a_{i,t})$, $F(\bar{a}_{i,t})$ 可被视为工业机器人的使用概率, 该概率也可视为企业内部劳动力被工业机器人所替代的比例。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 (V20) 可改写为:

$$y_{i,m,t}^n = z_t n_{i,m,t} H(\bar{a}_{i,t}). \quad (V22)$$

在 $t+1$ 期, 有比例为 δ 的在岗劳动力离职, 并有比例为 $F(\bar{a}_{i,t+1})$ 的在岗劳动力被工业机器人取代, 所以在 $t+1$ 期, 地区 i 中处于就业状态的劳动力等于上一期末离职且未被机器取代的劳动力, 具体表达形式见公式 (V23):

$$n_{i,m,t+1} = (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{i,t+1})) (n_{i,m,t} + q_{i,m,t}^v v_{i,m,t}). \quad (V23)$$

由于在 $t+1$ 期有比例为 $F(\bar{a}_{i,t+1})$ 的在岗劳动被自动化, 所以在 $t+1$ 期, 制造业企业所增加的工业机器人的量由公式 (V24) 表示:

$$I_{i,t}^a = (1 - \delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) (n_{i,m,t} + q_{i,m,t}^v v_{i,m,t}). \quad (V24)$$

两地区企业所分别拥有的工业机器人量由公式 (V25) 所表示:

$$A_{i,t+1} = (1 - \rho^a) A_{i,t} + I_{i,t}^a. \quad (V25)$$

两个地区制造业企业此时所面临的最优化问题为: 选择最优空缺职位, 最优劳动使用量, 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:

$$\Pi_{i,m,t} = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(p_{i,m,t} y_{i,m,t} - n_{i,m,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{i,m,t}(a_{i,t}) \frac{f(a_{i,t})}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_{i,t} - \kappa_{1,m,i} v_{i,m,t} - \kappa_{2,i} A_{i,t} \right), \quad (V26)$$

$\kappa_{1,m,i}$ 与 $\kappa_{2,i}$ 则分别表示两地区的企业开放一个新岗位与使用工业机器人的单位成本。

2. 非制造业企业

本文对非制造业企业的设定与制造业企业类似, 不同之处在于非制造业企业不使用机器人, 仅仅使用劳动力进行生产, 且非制造业企业也存在搜索匹配摩擦。

V.1.5 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。劳资双方的贝尔曼方程如公式 (V27) - (V31) 所示:

$$J_{i,m,t}^e(a_{i,t}) = p_{i,m,t}^n z_{i,t} a_{i,t} - w_{i,m,t}(a_{i,t}) + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{i,t+1})) J_{i,m,t+1}^e \\ & + (1 - \delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) J_{i,t+1}^a \\ & + \delta J_{i,m,t+1}^v \end{aligned} \right], \quad (V27)$$

$$J_{i,t}^a = p_{i,m,t}^a z_{i,t} a_{i,t}^* - \kappa_{2,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - \rho^a) J_{i,t+1}^a, \quad (V28)$$

$$J_{i,m,t}^v = -\kappa_{1,m,i} + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{i,t+1}))q_{i,m,t}^v J_{i,m,t+1}^e \\ & + (1-\delta)F(\bar{a}_{i,t+1})q_{i,m,t}^v J_{i,t+1}^a \\ & + q_{i,m,t}^v J_{i,m,t+1}^v \end{aligned} \right], \quad (\text{V29})$$

$$W_{i,m,t}(a_{i,t}) = w_{i,m,t}(a_{i,t}) + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{i,t+1}))W_{i,m,t+1} \\ & + (1-(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{i,t+1})))U_{i,m,t+1} \end{aligned} \right]. \quad (\text{V30})$$

以地区 1 为例, 该地区失业劳动力的价值函数为:

$$U_{1,m,t} = b_1 - \xi_{1,m,t}(1-\mu_t)(1-s_{1,t}) - \xi_{1,n,t}(1-\mu_t)s_{1,t} - \xi_{2,m,t}\mu_t(1-s_{2,t}) - \xi_{2,n,t}\mu_t s_{2,t} \\ + \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \left[\begin{aligned} & (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))q_{1,m,t}^u(1-\mu_t)(1-s_{1,t})W_{1,m,t+1} \\ & + (1-(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1})))q_{1,m,t}^u(1-\mu_t)(1-s_{1,t})U_{1,m,t+1} \\ & + (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,m,t}^u\mu_t(1-s_{2,t})W_{2,m,t+1} \\ & - (1-\delta)(1-F(\bar{a}_{2,t+1}))q_{2,m,t}^u\mu_t(1-s_{2,t})U_{2,m,t+1} \\ & + (1-\delta)q_{1,n,t}^u(1-\mu_t)s_{1,t}W_{1,n,t+1} \\ & - (1-\delta)q_{1,n,t}^u(1-\mu_t)s_{1,t}U_{1,n,t+1} \\ & + (1-\delta)q_{2,n,t}^u\mu_t s_{2,t}W_{2,n,t+1} \\ & - (1-\delta)q_{2,n,t}^u\mu_t s_{2,t}U_{2,n,t+1} \end{aligned} \right]. \quad (\text{V31})$$

本文采用经典的搜索与匹配模型设定, 将工资视为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劳动力与企业双方的净剩余, 实现最优配置。劳动力所获得的净剩余为 $W_{1,m,t}(a_{1,t}) - U_{1,m,t}$, 企业得到的净剩余为 $J_{1,m,t}^e(a_{1,t}) - J_{1,m,t}^v$, 该最优化问题如公式 (V32) 表示:

$$\max (W_{1,m,t}(a_{1,t}) - U_{1,m,t})^\eta (J_{1,m,t}^e(a_{1,t}) - J_{1,m,t}^v)^{1-\eta}, \quad (\text{V32})$$

η 表示劳动力对工资的议价能力, $0 < \eta < 1$, 通过最优化过程得到的最优条件为:

$$W_{1,m,t}(a_{1,t}) - U_{1,m,t} = \frac{\eta}{1-\eta} (J_{1,m,t}^e(a_{1,t}) - J_{1,m,t}^v). \quad (\text{V33})$$

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工业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 $J_{1,m,t}^e(\bar{a}_{1,t}) = J_{1,m,t}^a$ 。结合家庭部门与企业部门一阶条件与公式 (V33) 可以得到工资的决定方程:

$$w_{1,m,t} = (1-\eta)(b_1 - \xi_{1,m,t}) + \eta p_{1,m,t}^n z_{1,t} H(\bar{a}_{1,t}) + \eta \frac{\kappa_{11}}{q_{1,m,t}^v} \\ - \eta \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - q_{1,m,t}^u)(1-\delta)(1-F(\bar{a}_{1,t+1}))J_{1,m,t+1}^e. \quad (\text{V34})$$

通过对公式 (V34) 进行改写, 可得到关于使用机器人的生产率临界值的决定条件:

$$\bar{a}_{1,t} = \frac{1}{p_{1,m,t}^n z_{1,t}} \left(\begin{aligned} & b_1 - \xi_{1,m,t} + \left(\frac{\eta q_{1,m,t}^u - 1}{1-\eta} \right) \frac{\kappa_{11}}{q_{1,m,t}^v} + \frac{J_{1,t}^a}{1-\eta} \\ & + \frac{\eta}{1-\eta} (1 - q_{1,m,t}^u) \frac{J_{1,t}^a - (p_{1,m,t}^n z_{1,t} a_{1,t}^* - \kappa_{12})}{1-\rho^a} (1-\delta)F(\bar{a}_{1,t+1}) \end{aligned} \right). \quad (\text{V35})$$

V.1.6 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 的制造业企业与非制造业企业的招聘成本、使用工业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 (V36) 所

示:

$$c_t + \sum_{i=1}^2 \sum_{k \in \{m,n\}} \kappa_{V,m,i} v_{i,m,t} + \sum_{i=1}^2 \kappa_{2,i} A_{i,t} + \sum_{i=1}^2 \sum_{k \in \{m,n\}} q_{i,k,t} = y_t, \quad (\text{V36})$$

y_t 表示总产出, 总产出由地区 1 所生产的产品 $y_{1,t}$ 与地区 2 所生产的产品 $y_{2,t}$ 所构成, 具体形式表示如公式 (V37) 所表示:

$$y_t = \left[\varphi^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{1,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (1-\varphi)^{\frac{1}{\epsilon}} (y_{2,t})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}}, \quad (\text{V37})$$

(V37) 式中, φ 表示地区 1 所生产出产品的占总产品的权重, ϵ 表示两种产品之间的替代弹性。地区 1 所生产的产品与地区 2 所生产的产品最优需求如公式 (V38) 与公式 (V39) 所示:

$$\frac{p_{1,t}}{p_t} = \left(\varphi \frac{y_t}{y_{1,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (\text{V38})$$

$$\frac{p_{2,t}}{p_t} = \left((1-\varphi) \frac{y_t}{y_{2,t}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}, \quad (\text{V39})$$

其中 p_t 表示总产出的价格, 本文设为 1。

V.1.7 脉冲响应分析

图 V1 展示了地区 1 制造业与非制造业企业对机器人生产率冲击的脉冲响应。研究发现, 当制造业企业面临正向机器人生产率冲击时, 一方面, 其机器人使用量显著增加, 劳动生产率随之提升, 但劳动要素投入相应减少, 呈现出机器人技术的替代效应特征; 另一方面, 与前文一致, 制造业部门的岗位空缺数量收到生产率水平提高的影响而增多, 呈现出机器人技术的岗位创造特征。值得注意的是, 尽管就业规模收缩, 制造业工资水平却有所上升, 这源于生产率提升带来的工资增长效应, 最终推动产出扩张。与此同时, 非制造业部门则表现出明显的增长效应: 由于制造业劳动力需求下降, 劳动者开始向非制造业转移, 导致该部门劳动力供给增加, 岗位空缺增多, 就业规模扩大。然而, 劳动力供给的增加也使得非制造业工资水平承压下行。在劳动投入增加的推动下, 非制造业产出仍实现增长。这一结果表明, 自动化技术的冲击在部门间产生了异质性影响, 既带来了生产率的提升和产出的增长, 也引发了劳动力在行业间的重新配置和工资水平的分化。

从劳动力市场结构来看, 非制造业部门 (如餐饮住宿、零售批发、物流运输、家政服务等) 通常具有较低的就业门槛和较强的劳动力吸纳能力。以平台经济为例, 外卖配送员、网约车司机等新兴职业往往只需完成简单的平台注册程序即可上岗, 几乎不存在严格的技能筛选机制。这种就业特性使得失业劳动力在非制造业实现再就业的难度显著低于制造业, 同时也导致岗位空缺数量在非制造业就业形成过程中发挥着比制造业更为关键的作用。为深入考察这一机制, 图 I2 通过数值模拟展示了当非制造业岗位空缺匹配弹性^① $1-\alpha_L$ 从 0.4 提升至 0.6 时, 地区 1 制造业机器人生产率冲击对该地区非制造业就业的动态影响过程。

^① 非制造业岗位空缺匹配弹性越高, 意味着岗位空缺对最终就业的形成越为重要。

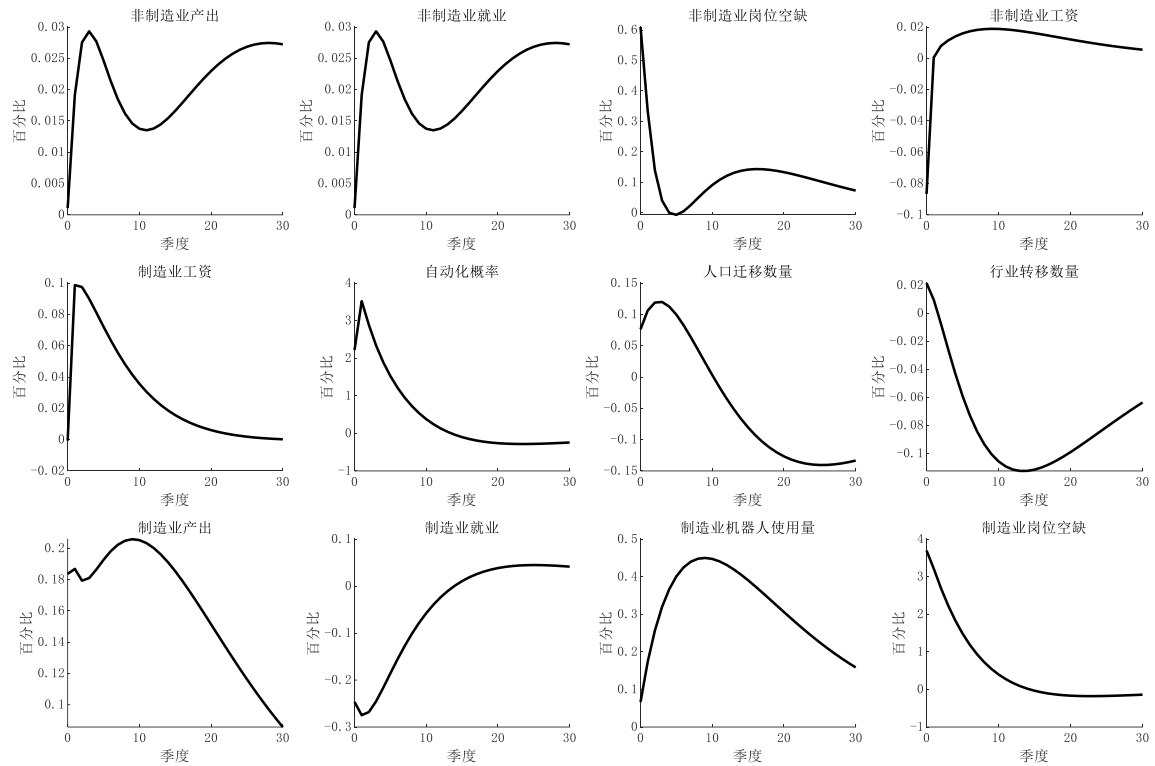


图 V1 地区 1 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

注：人口迁移比例表示家庭向地区 1 迁移的劳动力数量，行业转移比例表示家庭向非制造业转移的劳动力数量

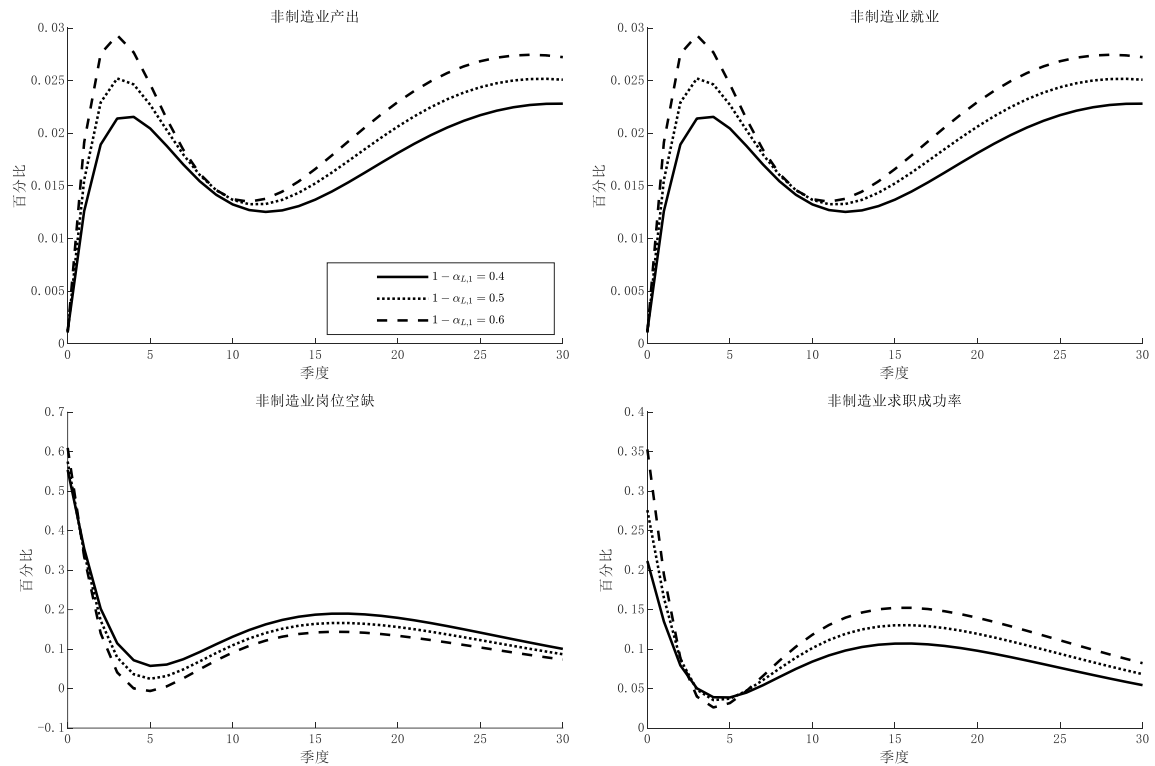


图 V2 不同匹配弹性下地区 1 非制造业各变量的脉冲响应

图 V2 的模拟结果显示,随着非制造业岗位空缺匹配弹性 $1-\alpha_L$ 的提升,该部门呈现出以下动态特征:首先,就业规模扩张幅度显著增大,部门产出水平同步提升;其次,劳动力市场匹配效率改善表现为求职成功率的持续上升。值得注意的是,由于岗位空缺对就业形成的边际贡献增强,当匹配弹性 $1-\alpha_L$ 提高时,均衡状态下的岗位空缺数量反而呈现下降趋势。

图 V3 展示了地区 2 制造业企业与非制造业企业对地区 1 的机器人生产率冲击的脉冲响应。模拟结果显示,地区 2 呈现出以下发展特征:①当地自动化发展滞后,导致机器人使用量下滑,制造业就业人数出现增长,促进了制造业产出的上升,因此地区 2 制造业呈现出劳动密集型的特点。②非制造业岗位空缺出现增长,非制造业就业人数与产出上升,而非制造业工资则同样由于劳动供给的增加而下滑。

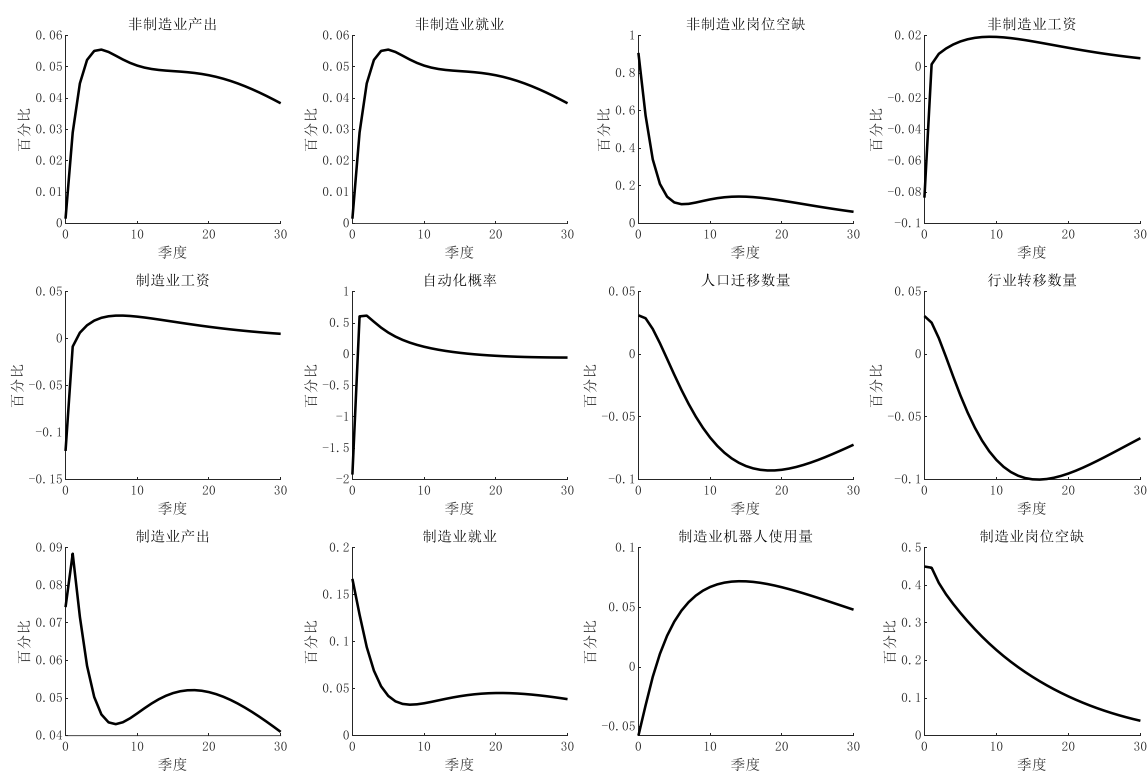


图 V3 地区 2 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

结合图 V1 与图 V3 可以发现,相较于正文中给出的两地区单一部门模型,在模型中添加地区一行业差异特征后,从地区层面来看,失业后继续寻找工作的劳动力更为均衡地向两地流动,这体现在冲击发生后,地区 1 的人口迁移数量偏离稳态百分比的峰值为 0.13%左右,而地区 2 的峰值仅为 0.02%左右,说明在该冲击下,劳动力仍主要还是流向地区 1。从行业层面来看,在两地区中,劳动力均向非制造业发生转移,说明了地区 1 的自动化生产率冲击均促进了两地区的服务业发展,即引发了劳动力从制造业向非制造业的“挤出”。总体而言,工业自动化对劳动力市场的塑造影响——部门挤出和地区再配置往往是伴生、交织的。并且从现实意义角度来看,地区一行业差距模型更能解释近年以来全国各地区服务业劳动力占比逐年升高的趋势。

V.2 政策模拟

前文基准模拟研究表明,地区间工业机器人应用水平的差异会扩大区域间劳动力收入差距,并引致劳动力流动格局的改变。本部分研究旨在探讨如何通过政策干预缓解因机器人应用差距导致的

区域收入分化与劳动力配置失衡问题,从而优化劳动力空间配置,促进区域协调发展。基于前文构建的理论模型,我们将重点分析支持欠发达地区工业自动化改造的政策效应。

由于我国不同地域之间存在的禀赋不同,不同地区在工业机器人的发展程度与应用方面表现出差异化的特点。如何实现落后的地区的追赶是关乎实现我国区域间协调发展的重要问题。当前我国区域经济增长过程呈现出竞争的格局,财政分权与官员竞争所带来的经济激励与政治激励成为地方参与竞争的主要推动力(周黎安,2004; Li and Zhou, 2005)。为了在区域竞争中占据一席之地,完成高质量发展目标,“十四五”以来各省市密集出台未来产业政策,所发布的产业政策多与新材料制造、新能源汽车制作、人工智能与半导体产业等需要工业机器人密集参与的产业所相关^①。基于以上现实情况,本部分基于基准模型,研究欠发达地实施工业自动化进程,依靠机器人生产率提升,能否缩小与发达地区的劳动力收入差距,进而能否避免劳动力在空间配置上的失衡。

图 V4 展示了在地区 2 机器人生产率提高的情境下,两地区主要经济变量的变化情况。对于地区 2 而言,机器人生产率的上升显著提高了自动化概率,推动了机器人使用量的增加,并带动了自动化产品的产出增长。随着机器人使用量的上升,企业对低技能劳动的需求减少,而对高技能劳动的需求增加,体现出自动化技术“替代低技能、互补高技能”的典型特征。机器人生产率的提升还增强了企业扩张岗位的动力,使地区 2 的岗位空缺数量增加,反映出自动化所带来的生产率效应或岗位创造效应。在劳动力流动方面,地区 2 自动化水平的提升对低技能与高技能劳动者的工资均产生了正向影响,从而吸引了两类劳动者向该地区流动。

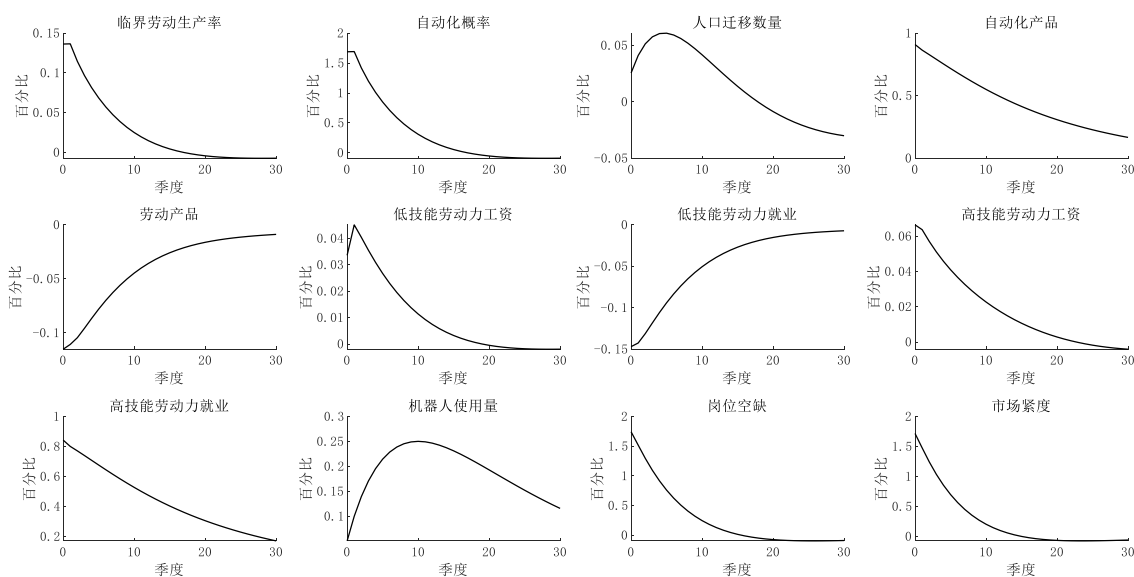


图 V4 地区 2 中各经济变量在地区 2 正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

^① 2022 年河南省人民政府印发《河南省“十四五”制造业高质量发展规划》,提出大力发展智能装配、重载物流等工业机器人。2022 年河北省人民政府办公厅印发《河北省制造业高质量发展“十四五”规划》,提出加大智能装备产业政策支持力度。2022 年辽宁省人民政府印发《辽宁省推进“一圈一带两区”区域协调发展三年行动方案的通知》,重点发展新一代信息技术、新能源、新材料等产业,开发工业机器人等终端产品。

图 V5 展示了在地区 2 受到机器人生产率冲击的情境下,地区 1 主要经济变量的脉冲响应过程。结果显示,受地区 2 机器人生产率上升所带来的虹吸效应影响,地区 1 的自动化概率有所下降,劳动力流向地区 2,进而导致两地区之间在产出、低技能劳动力收入、机器人使用量以及劳动力使用量等方面的差距显著缩小。综合以上分析可见,若落后地区能够推进自动化改造,不仅有助于提升其自身的生产率和劳动力薪资水平,也有助于在一定程度上缓解劳动力外流,缩小与发达地区在产出、收入及劳动力配置等方面的差距。

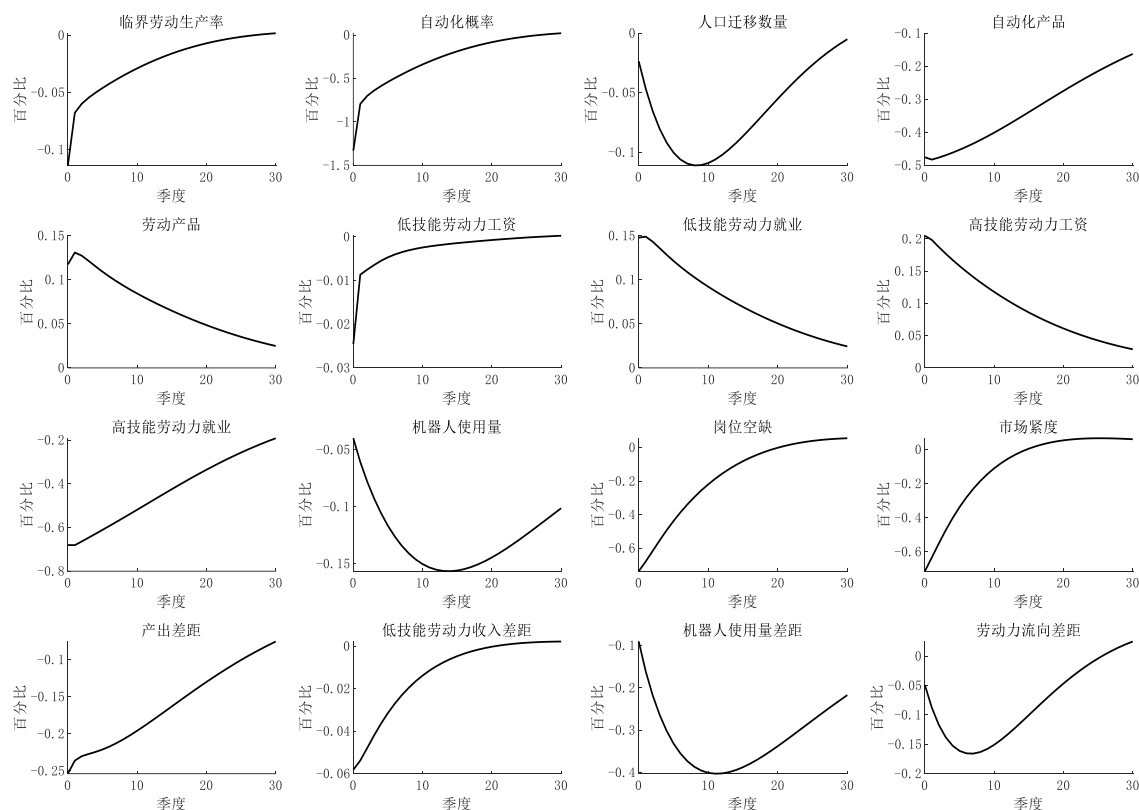


图 V5 地区 1 中各经济变量在地区 2 正向机器人生产率冲击下的脉冲响应

V.3 稳健性检验

基准模型模拟结果表明,区域间工业自动化发展水平的差异会改变地区间的劳动力收入差距,并在空间层面引发劳动力流动的变化,进而影响要素使用、产出等关键经济变量。为检验模型所揭示的传导机制是否稳健,有必要进一步考虑现实情境与模型假设之间的差异,并开展稳健性分析。具体方法是将基础模型中的部分设定调整为更贴近现实的假设,进而观察模型在不同设定下的模拟结果是否具有 consistency 与稳定性。本文在本部分引入了机器人安装存在时滞以及工资具有粘性的设定,并模拟了相应情境下主要经济变量的脉冲响应过程,结合基础模型的结果进行对比,以分析模型机制的稳健性。

V.3.1 机器人的安装存在时滞

在基准模型中,工业机器人的安装与使用在一期内完成,然而在现实生活中,工业机器人从安装到使用需要一定的时间,即存在工业机器人的安装存在时滞。因此在稳健性检验中,本文考虑了工业机器人的安装时滞,具体表现形式为将工业机器人存量 $A_{i,t}$ 滞后一期,变为 $A_{i,t-1}$,即在 t 期企业并非

使用 t 期的工业机器人存量 $A_{i,t}$ 进行生产,而是使用上一期的机器人存量 $A_{i,t-1}$ 进行生产,因此两地区企业的生产函数可变更为公式 (V40):

$$\begin{cases} y_{j,i,t}^n = z_t n_{l,j,i,t} a_{j,i,t}, & a_{j,i,t} > \bar{a}_{i,t} \\ y_{j,i,t}^a = z_t (A_{j,i,t-1} a_{i,t}^*)^{\alpha_a} n_{sj,i,t}^{1-\alpha_a}, & a_{j,i,t} \leq \bar{a}_{i,t} \end{cases} \quad (\text{V40})$$

$i \in \{1,2\}$, 由于生产函数发生变动, 因此两地区的企业的利润函数也相应的发生变化, 该利润函数如公式 (V41) 所示:

$$\Pi_{i,t} = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{\lambda_t}{\lambda_0} \left(y_{i,t} - n_{l,i,t} \int_{\bar{a}_{i,t}}^{\infty} w_{l,i,t}(a_i) \frac{f(a_i)}{1-F(\bar{a}_{i,t})} da_i - \kappa_{1,i} v_{i,t} - \kappa_{2,i} A_{i,t-1} \right). \quad (\text{V41})$$

企业使用工业机器人的价值函数则变更为:

$$J_{i,t}^a = \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (\alpha_a p_{i,t+1}^a z_{t+1} (a_{i,t+1}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a-1} n_{s,i,t+1}^{1-\alpha_a} - \kappa_{2,i} + (1-\rho^a) J_{i,t+1}^a), \quad (\text{V42})$$

公式 (V42) 表示企业使用工业机器的价值 $J_{i,t}^a$ 取决于在 $t+1$ 期实际安装完成并能投入使用的工业机器人的生产率, 由此可推导出机器人生产率临界值 $\bar{a}_{i,t}$ 决定条件变更为公式 (V43)。模型其余部分与参数选取与基准模型相一致。

$$\bar{a}_{i,t} = \frac{1}{p_{i,t}^n z_t} \left(b_i - \xi_{i,t} + \left(\frac{\eta q_{i,t}^u - 1}{1-\eta} \right) \frac{\kappa_{i1}}{q_{i,t}^v} + \frac{J_{i,t}^a - \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (\alpha_a p_{i,t+1}^a z_{t+1} (a_{i,t+1}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a-1} n_{s,i,t+1}^{1-\alpha_a} - \kappa_{2,i})}{1-\rho^a} (1-\delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) \right) \quad (\text{V43})$$

模拟该模型的结果如下图 V6 与图 V7 所示。与基准模型相比, 模型对机器人生产率冲击的敏感程度下降, 各经济变量的波动幅度获得了一定程度的下降。这是由于机器人生产率发生正向冲击, 机器人不能立即投入生产使用, 而是滞后一段时间生效, 这样就抑制了模型中变量的剧烈短期波动,

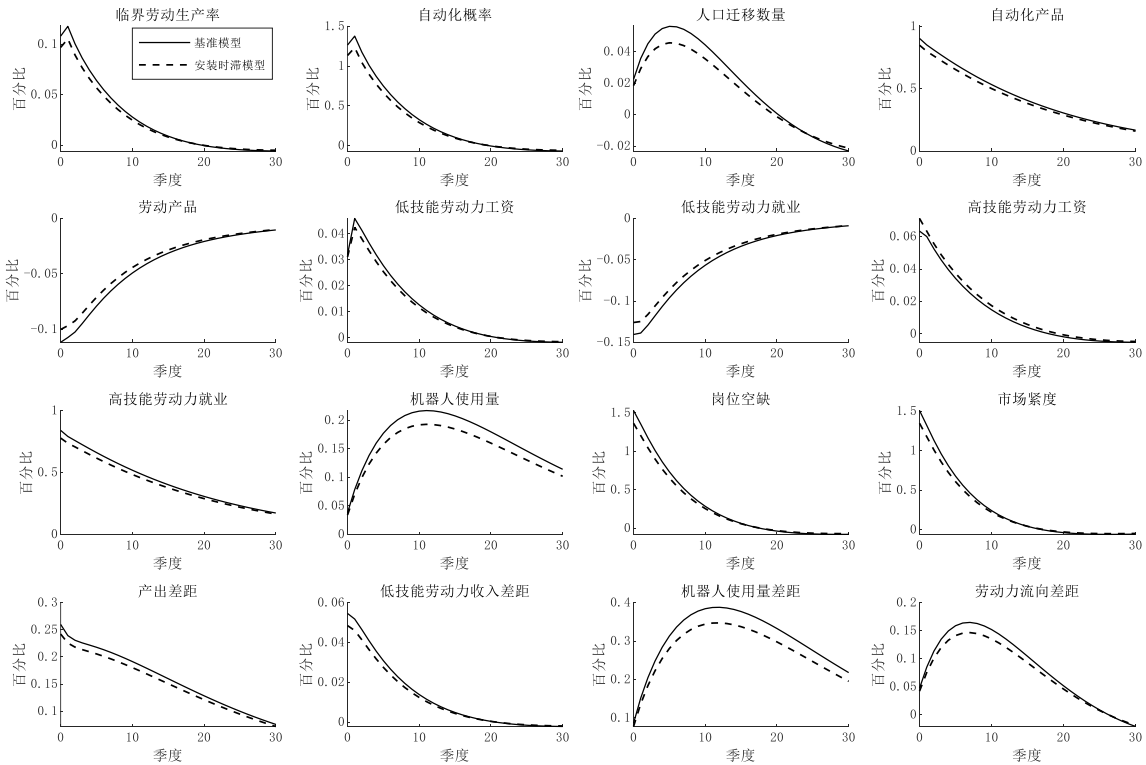


图 V6 地区 1 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产效率冲击下的脉冲响应

短期内对生产要素调整、工资调整产生了一定缓冲作用,从而减弱了模型对外部冲击的即期敏感性。

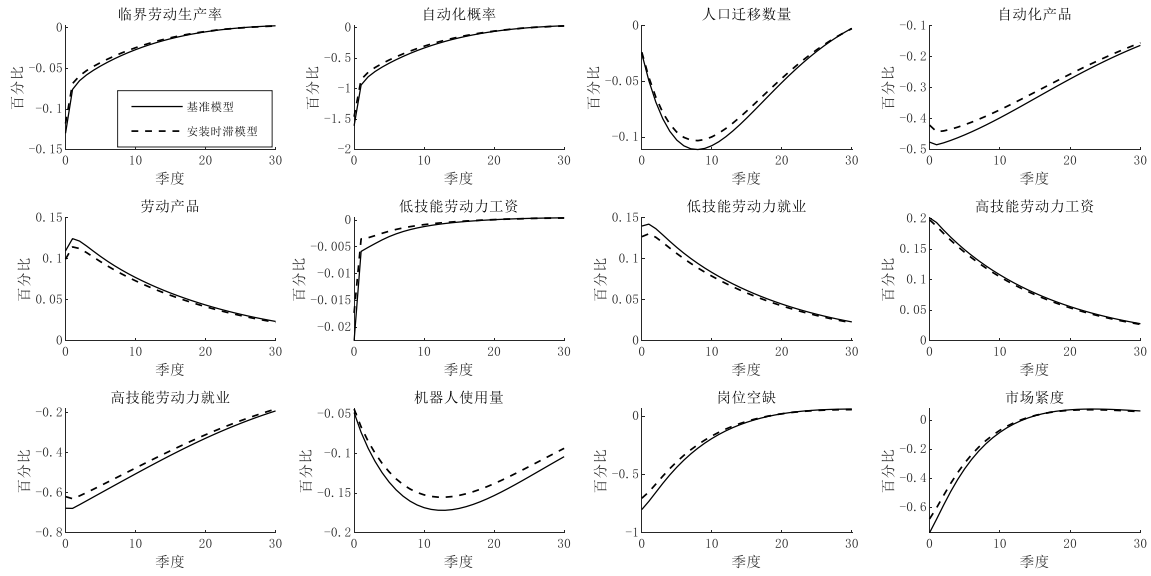


图 V7 地区 2 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产效率冲击下的脉冲响应

V.3.2 工资粘性

在现实中,工资并不能在每一期进行灵活调整,而是在一定时间内保持在一定的水平,即工资表现出一定的不随时间变化的粘性。因此为了进一步验证模型传导渠道的稳定性,本部分参考 Hall (2003) 的研究引入工资粘性的假定。在价格粘性的设定下,低技能劳动力工资 $w_{l,i,t}$ 则是由实际工资 $w_{l,i,t}^n$ 与工资标准 $\bar{w}_{l,i}$ 共同决定,即低技能工资 $w_{l,i,t}$ 是实际工资与工资标准的加权平均(见公式 (V44))。

$$w_{l,i,t} = \gamma w_{l,i,t}^n + (1 - \gamma) \bar{w}_{l,i}, \quad (\text{V44})$$

$i \in \{1, 2\}$, γ 表示价格粘性的程度, $0 < \gamma < 1$, 本文参考 Hall (2003) 的假定, 将实际工资 $w_{l,i,t}^n$ 设定为纳什工资, 并将工资标准 $\bar{w}_i$ 设定为稳态工资。根据上述模型的改动, 可将地区 1 与地区 2 的工资决定公式改写为公式 (V45)。

$$w_{l,i,t} = \gamma \left[\frac{(1 - \eta)(b_i - \xi_{i,t}) + \eta p_{i,t}^n z_t H(\bar{a}_{i,t}) + \eta \frac{\kappa_{i,t}}{q_{i,t}^v}}{-\eta \beta \frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} (1 - q_{i,t}^u) (1 - \delta) (1 - F(\bar{a}_{i,t+1})) J_{i,t+1}^e} \right] + (1 - \gamma) \bar{w}_{l,i}. \quad (\text{V45})$$

由于引入了价格粘性, 因此使用工业机器人的临界生产率的决定公式变更为公式 (V46)

$$\bar{a}_{i,t} = \frac{1}{(1 - \eta \gamma) p_{i,t}^n z_t} \left(\frac{\gamma (1 - \eta)(b_i - \xi_{i,t}) + (\gamma \eta q_{i,t}^u - 1) \frac{\kappa_{i,t}}{q_{i,t}^v} + \gamma J_{i,t}^a}{+ \gamma \eta (1 - q_{i,t}^u) \frac{J_{i,t}^q - (\alpha_a p_{v,t}^a z_t (a_{v,t}^*)^{\alpha_a} A_{i,t}^{\alpha_a - 1} n_{s,i,t}^{1 - \alpha_a - \kappa_{2,i}})}{1 - \rho^a} (1 - \delta) F(\bar{a}_{i,t+1}) + (1 - \gamma) \bar{w}_{l,i}} \right). \quad (\text{V46})$$

上述模型模拟结果如图 V8 与 V9 所示。相较于基准模型, 在引入工资粘性假设后, 由于工资水平不能灵活自由地进行调整, 地区 1 的工资上涨幅度明显减弱, 进而导致选择前往地区 1 就业的劳动力比例有所下降。在此背景下, 工业机器人生产率上升所引发的替代效应减弱, 更多岗位得以保留, 就业规模的收缩幅度也相应减小, 且工业机器人的使用量增幅有所放缓。总体来看, 引入工资

粘性设定后, 模型各主要变量的动态响应方向未发生根本改变, 仅在响应幅度上出现一定程度的减缓, 表明模型机制在该设定下具有较强的稳健性。

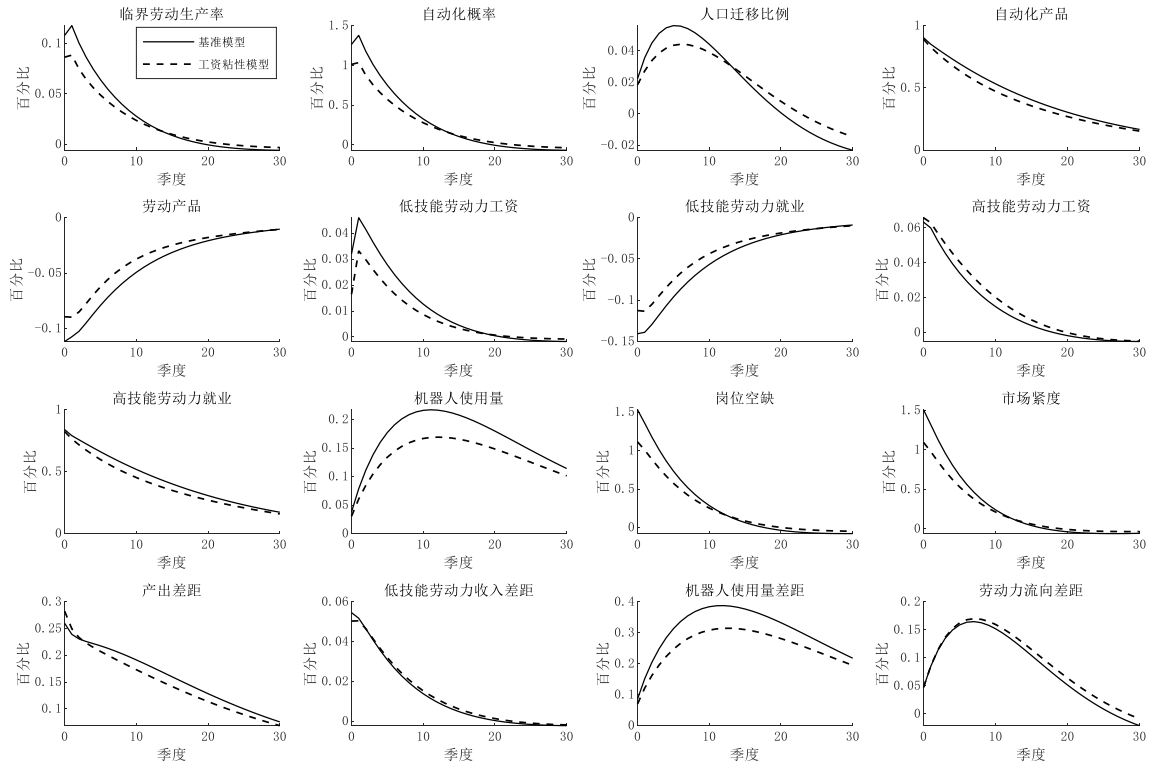


图 V8 地区 1 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产效率冲击下的脉冲响应

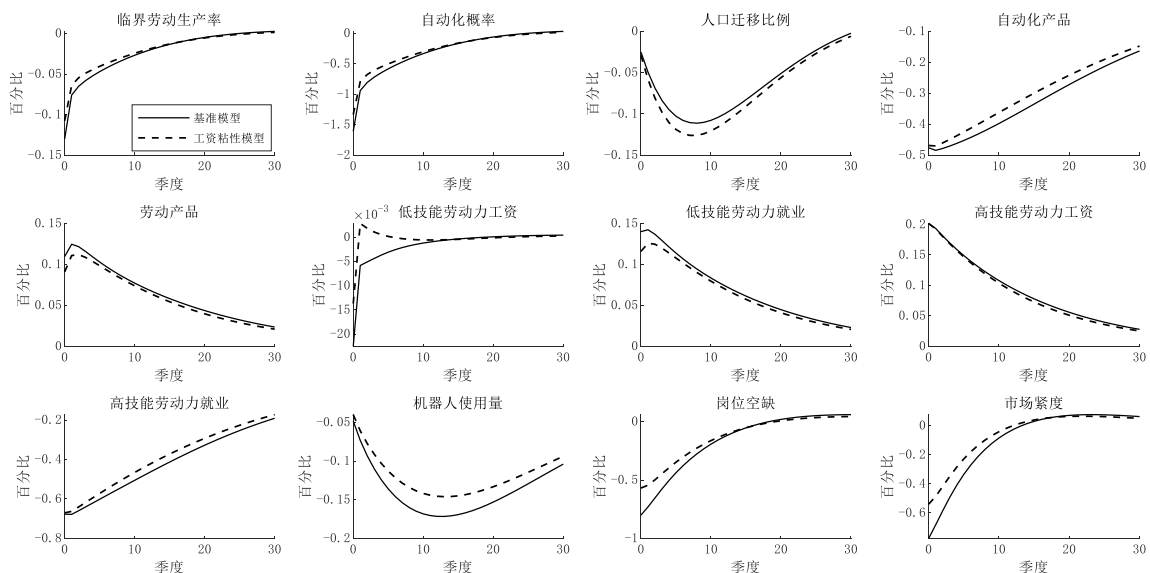


图 V9 地区 2 中各经济变量在地区 1 正向机器人生产效率冲击下的脉冲响应

参考文献

- [1] Akita, T., and S. Miyata, “The Dimensional Decomposition of Regional inequality Based on the Weighted Coefficient of Variation”, *Letters in Spatial & Resource Sciences*, 2010, 3(3), 91–100.
- [2] 才国伟、张学志、邓卫广, “省直管县’改革会损害地级市的利益吗? ”, 《经济研究》, 2011 年第 7 期, 第 65-77 页。
- [3] 范长煜、邓韵雪, “‘机器换人’背景下工人失业担忧研究——基于广东省制造业‘企业—职工’匹配调查数据”, 《社会学评论》, 2022 年第 2 期, 第 67-87 页。
- [4] Hall, R. E., “Wage Determination and Employment Fluctuations”, Working Paper, 2003.
- [5] Li, H., and L. A. Zhou, “Political Turnover and Economic Performance: The incentive Role of Personnel Control in China”, *Journal of Public Economics*, 2005, 89(9–10), 1743–1762.
- [6] Liu, Y., 2013, “Labor market matching and unemployment in urban China”, *China Economic Review*, 24:108–128. Moutos, T., 2006, “Technological Change, Inequality and Work Sharing”, *Scottish Journal of Political Economy*, 53(3):305–332.
- [7] Oikonomou, M., “Migration, Search and Skill Heterogeneity”, *international Monetary Fund*, 2023.
- [8] 覃成林、张华、张技辉, “中国区域发展不平衡的新趋势及成因——基于人口加权变异系数的测度及其空间和产业二重分解”, 《中国工业经济》, 2011 年第 10 期, 第 37-45 页。
- [9] 赵春明、李震、李宏兵、彭刚, “机器换人——工业机器人使用与区域劳动力市场调整”, 《北京师范大学学报(社会科学版)》, 2020 年第 6 期, 第 113-127 页。
- [10] 张晓娣, “公共部门就业对宏观经济稳定的影响——基于搜索匹配模型的 DSGE 模拟与预测”, 《中国工业经济》, 2016 年第 4 期, 第 39-56 页。
- [11] Eden, M., and P. Gaggli, “On the Welfare implications of Automation”, *Review of Economic Dynamics*, 2018, 29(7), 15–43.
- [12] 周黎安, “晋升博弈中政府官员的激励与合作——兼论我国地方保护主义和重复建设问题长期存在的原因”, 《经济研究》, 2004 年第 6 期, 第 33-40 页。

注：该附录是期刊所发表论文的组成部分，同样视为作者公开发表的内容。如研究中使用该附录中的内容，请务必在研究成果上注明附录下载出处。