附 录

正文未报告部分

模型与假说

1.基本模型的均衡分析

厂商在任务i中使用Z技能水平的工人和相应资本，利润函数为：

$$\Pi_Z(i)=p(i)y(i)-\int_0^{A_Z}R_Z(j)k_Z(i,j)dj-W_ZZ(i)$$
$$=\beta p(i)^{1/\beta}A_Z\alpha_Z(i)Z(i)-W_ZZ(i)$$

由最终品的生产函数可知，分布在连续单位区间$[0,1]$上的所有任务都需被执行，完全竞争市场中，均衡时必然有$\Pi_Z(i)=0$。均衡时劳动力市场出清，必然存在某一任务I_L使得$\pi_M(I_L)-\pi_L(I_L)=0$，$i<I_L$时，$\pi_M(i)-\pi_L(i)<0$；存在某一任务I_H使得$\pi_H(I_H)-\pi_M(I_H)=0$，$i>I_H$时，$\pi_H(I_H)-\pi_M(I_H)>0$[①]。这意味着，不同技能水平的工人承担不同区间任务的生产，中、低技能工人不能胜任高度复杂的任务，追求最高报酬的高技能工人也不会执行简单任务,数学表达式为：当$0<i<I_L$时，$m(i)=h(i)=0$；当$I_L<i<I_H$时，$l(i)=h(i)=0$；当$I_H<i<1$时，$l(i)=m(i)=0$。

2.有智能物质资本投入的均衡分析

最终品厂商投入智能物质资本时，任务i的生产函数为：

$$y(i)=p(i)^{(1-\beta)/\beta}[A_L\alpha_L(i)l(i)+A_M\alpha_M(i)m(i)+A_H\alpha_H(i)h(i)+A_Q\alpha_Q(i)q(i)]$$

其中，$q(i)$和$\alpha_Q(i)$分别为智能物质资本在常规性生产任务i中的数量和生产效率，在非常规性生产任务中$\alpha_Q(i)=0$（Acemoglu and Autor，2011；Acemoglu and Restrepo，2016,2017）。根据前述基本模型的分析，任务i的生产函数可进一步表示为：

$$y(i)=p(i)^{(1-\beta)/\beta}A_L\alpha_L(i)l(i) \qquad 0<i<I_L$$
$$y(i)=p(i)^{(1-\beta)/\beta}[A_M\alpha_M(i)m(i)+A_Q\alpha_Q(i)q(i)] \qquad I_L<i<I_H$$
$$y(i)=p(i)^{(1-\beta)/\beta}A_H\alpha_H(i)h(i) \qquad I_H<i<1$$

上式意味着，区间$[0,I_L]$代表的非常规性生产任务中的体力劳动或手工任务，为低技能工人承担；区间$[I_L,I_H]$中的任务可视为常规性任务，为中等技能工人承担；区间$[I_H,1]$包括的分析、认知型任务和创造性任务，需要具有高教育程度和较强创新能力的工人执行生产。

借鉴 Acemoglu and Autor（2011）的做法，设定存在任务区间$[I_{-\varepsilon},I_\varepsilon]\subset[I_L,I_H]$，在区间$[I_{-\varepsilon},I_\varepsilon]$内，智能物质资本的生产效率$\alpha_Q(i)$足够大，使得企业用智能物质资本替代中等技能工人更加经济，而在区间$[I_{-\varepsilon},I_\varepsilon]$外，$\alpha_Q(i)$足够小。在这里，可得到新的任务边界$I_L'$和$I_H'$：当$0<i<I_L'$时，$m(i)=h(i)=q(i)=0$；当$I_{-\varepsilon}<i<I_\varepsilon$时，$l(i)=m(i)=h(i)=0$；当$I_L'<i<I_{-\varepsilon}$和$I_\varepsilon<i<I_H'$时，$l(i)=h(i)=q(i)=0$；当$I_H'<i<1$时，$l(i)=m(i)=q(i)=0$。

企业投入工业机器人为代表的智能物质资本，执行部分原来由中等技能工人承担的生产任务，中等技能工人面临的就业需求会发生改变。最终品厂商在每个任务最小化其生产成本，得到任务i

① 因为$\alpha_L(i)/\alpha_M(i)$和$\alpha_M(i)/\alpha_H(i)$是连续可导的严格减函数，$\pi_H(i)-\pi_M(i)$和$\pi_M(i)-\pi_L(i)$是连续可导的严格增函数。其中，$\pi_Z(i)=\Pi_Z(i)/Z$。

对三种技能工人的需求函数：当$0<i<I'_L$时，$l(i)=Y/[p(i)^{1/\beta}\alpha_L(i)A_L]$；当$I'_L<i<I_{-\varepsilon}$和$I_\varepsilon<i<I'_H$时，$m(i)=Y/[\ p(i)^{1/\beta}\alpha_M(i)A_M]$；当$I'_H<i<1$时，$h(i)=Y/[p(i)^{1/\beta}\alpha_L(i)A_L]$。

拥有相同技能禀赋的工人在其执行的各个任务中的边际生产率相等，即$p(i)^{1/\beta}\alpha_L(i)=p(i')^{1/\beta}\alpha_L(i')$，$i,i'\in(0,I'_L)$。定义$P_L$为低技能工人执行任务的价格指数，$P_L\equiv p(i)^{1/\beta}\alpha_L(i)=p(i')^{1/\beta}\alpha_L(i')$。同理，定义$P_M$和$P_H$分别为中、高技能工人执行任务的价格指数，$P_M\equiv p(i)^{1/\beta}\alpha_M(i)=p(i')^{1/\beta}\alpha_M(i')$，$i,i'\in(I'_L,I_{-\varepsilon})\cup(I_\varepsilon,I'_H)$，$P_H\equiv p(i)^{1/\beta}\alpha_H(i)=p(i')^{1/\beta}\alpha_H(i')$，$i,i'\in(I'_H,1)$。加总得到对三种技能工人的总需求：

$$L^d=YI'_L/(P_LA_L)，\ M^d=Y(I'_H-I'_L-\varepsilon)/(P_MA_M)，\ H^d=Y(1-I'_H)/(P_HA_H)$$

3. 地区智能化发展差异与不同技能劳动力需求

智能化发展程度有两种衡量方式，一种是智能物质资本作用的任务区间$[I_{-\varepsilon},I_\varepsilon]$的大小，即$\varepsilon$的大小，这里利用另一种衡量方式，即任务区间$[I_{-\varepsilon},I_\varepsilon]$在区间$[I_L,I_H]$上的位置，划分智能化发展的两个阶段。在智能化发展程度较低的地区，新的任务边界分别为I_L^1、I_ε^1和I_H^1。在任务边界I_L^1处，使用低技能工人的边际生产率应等于使用智能物质资本的边际生产率；在任务边界I_ε^1处，使用智能物质资本的边际生产率应等于使用中等技能工人的边际生产率；在任务边界I_H^1处，使用中等技能工人的边际生产率应等于使用高技能工人的边际生产率。以上无套利条件具体可表示为：

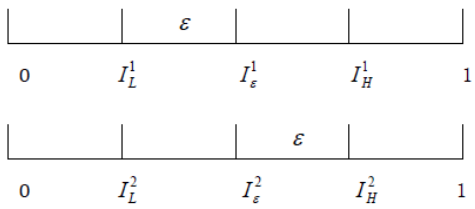

图 1：智能化发展初期和后期的任务区间

$$A_L\alpha_L(I_L^1)L/I_L^1=A_Q\alpha_Q(I_L^1)Q/\varepsilon$$
$$A_Q\alpha_Q(I_\varepsilon^1)Q/\varepsilon=A_M\alpha_M(I_\varepsilon^1)M/(I_H^1-I_L^1-\varepsilon)$$
$$A_M\alpha_M(I_H^1)M/(I_H^1-I_L^1-\varepsilon)=A_H\alpha_H(I_H^1)H/(1-I_H^1)$$

在智能化发展程度较高的地区，新的任务边界分别为I_L^2、I_ε^2和I_H^2，三个边界处的无套利条件可表示为：

$$A_L\alpha_L(I_L^2)L/I_L^2=A_M\alpha_M(I_L^2)M/(I_H^2-I_L^2-\varepsilon)$$
$$A_M\alpha_M(I_\varepsilon^2)M/(I_H^2-I_L^2-\varepsilon)=A_Q\alpha_Q(I_\varepsilon^2)Q/\varepsilon$$
$$A_Q\alpha_Q(I_H^2)Q/\varepsilon=A_H\alpha_H(I_H^2)H/(1-I_H^2)$$

综合正文（6）式和无套利条件公式，并求对数微分可得到以下结论：

（1）在智能化发展程度较低的地区，中等技能工人的相对就业需求下降，而相对于高技能工人，低技能工人的就业需求上升。

$$\frac{d\ln(M^d/H^d)}{d\varepsilon}=\frac{\Lambda^1\gamma_H^1(I_H^1)(1-\varepsilon\Phi^1)}{\varepsilon\Phi^1(\Omega^1-\Lambda^1)}<0$$

$$\frac{d\ln(M^d/L^d)}{d\varepsilon}=\frac{\Omega^1[\Lambda^1(1-\varepsilon\Phi^1)+1/I_L^1]-\Lambda^1/I_L^1}{\varepsilon\Phi^1(\Omega^1-\Lambda^1)}<0$$

$$\frac{d\ln(H^d/L^d)}{d\varepsilon}=\frac{\Lambda^1\varepsilon I_L^1[\Phi^1-1/\varepsilon]+(1-I_H^1)(\Omega^1-\Lambda^1)}{\varepsilon I_L^1(1-I_H^1)\Phi^1(\Omega^1-\Lambda^1)}<0$$

其中，$\gamma_H^1(I_H^1)\equiv\ln\alpha_M(I_H^1)-\ln\alpha_H(I_H^1)$，$\gamma_L^1(I_L^1)\equiv\ln\alpha_L(I_L^1)-\ln\alpha_Q(I_L^1)$，$\Lambda^1=1/(I_H^1-I_L^1-\varepsilon)$，$\Omega^1=\gamma_H^1(I_H^1)-1/(1-I_H^1)$，$\Phi^1=\gamma_L^1(I_L^1)-1/I_L^1$。

（2）在智能化发展程度较高的地区，中等技能工人的相对就业需求下降，而相对于低技能工人，高技能工人的就业需求上升。

$$\frac{d\ln(M^d/H^d)}{d\varepsilon}=\frac{\Phi^2[\Lambda^2(1-\varepsilon\Omega^2)+1/(1-I_H^2)]-\Lambda^2/(1-I_H^2)}{\varepsilon\Omega^2(\Phi^2-\Lambda^2)}<0$$

$$\frac{d\ln(M^d/L^d)}{d\varepsilon}=\frac{\Lambda^2\gamma_L^2(I_L^2)(1-\varepsilon\Omega^2)}{\varepsilon\Omega^2(\Phi^2-\Lambda^2)}<0$$

$$\frac{d\ln(H^d/L^d)}{d\varepsilon}=-\frac{\Lambda^2\varepsilon(1-I_H^2)[\Omega^2-1/\varepsilon]+I_L^2(\Phi^2-\Lambda^2)}{\varepsilon I_L^2(1-I_H^2)\Omega^2(\Phi^2-\Lambda^2)}>0$$

其中，$\gamma_H^2(I_H^2)\equiv\ln\alpha_Q(I_H^2)-\ln\alpha_H(I_H^2)$，$\gamma_L^2(I_L^2)\equiv\ln\alpha_L(I_L^2)-\ln\alpha_M(I_L^2)$，$\Lambda^2=1/(I_H^2-I_L^2-\varepsilon)$，$\Omega^2=\gamma_H^2(I_H^2)-1/(1-I_H^2)$，$\Phi^2=\gamma_L^2(I_L^2)-1/I_L^2$

在智能化发展程度较低的地区，面对不断扩大的先进设备投资，对中等技能工人的相对需求会减小，但相较于高技能工人，对低技能工人的需求上升幅度更大。随着智能物质资本任务区间ε的扩大，劳动力可以执行的常规性任务区间缩小，具体的数学表达式体现为$d(I_H^1-I_L^1-\varepsilon)/d\varepsilon=\Omega^1(1-\varepsilon\Phi^1)/[\varepsilon\Phi^1(\Omega^1-\Lambda^1)]<0$。部分挤出的中等技能工人因原先执行的生产任务位于$[0,1]$的前端位置，不能胜任较高复杂程度的任务，会向非常规手工任务岗位转移。非常规手工任务区间扩大，$dI_L^1/d\varepsilon=-1/\varepsilon\Phi^1>0$，扩大的任务区间不仅吸纳了部分转移出的中等技能工人，更增加了对低技能工人的需求。非常规抽象任务区间缩小，$d(1-I_H^1)/d\varepsilon=\Lambda^1(\Phi^1-1/\varepsilon)/[\Phi^1(\Omega^1-\Lambda^1)]<0$，对高技能工人的需求增长幅度小于低技能工人。工业智能化发展程度较低的地区，未能引进最先进的智能机器设备，或者即使引入了包含前沿技术的设备，落后的基础条件等因素也不能使其发挥最大的生产效率。“机器换人”替代了部分中等技能工人，更增加了对维护智能成套设备以及执行其他基础工作的低技能工人的需求。

在智能化发展程度较高的地区，面对智能设备投资的大规模增长，对中等技能工人的相对需求会减小，对高技能工人的需求相比低技能工人上升幅度更大。随着智能物质资本作用任务区间ε的增大，劳动力执行的常规性任务区间缩小，具体的数学表达式为$d(I_H^2-I_L^2-\varepsilon)/d\varepsilon=\Phi^2(1-\varepsilon\Omega^2)/[\varepsilon\Omega^2(\Phi^2-\Lambda^2)]<0$，部分挤出的中等技能工人因原先执行的生产任务位于$[0,1]$的后端位置，具有较强的技术能力和专业素养，能够胜任较复杂的生产任务，会向非常规抽象任务岗位转移。非常规手工任务区间缩小，$dI_L^2/d\varepsilon=\Lambda^2(\Omega^2-1/\varepsilon))/[\Omega^2(\Phi^2-\Lambda^2)]<0$。非常规抽象任务区间扩大，$d(1-I_H^2)/d\varepsilon=-1/\varepsilon\Omega^2>0$，扩大的任务区间不仅吸纳了部分转移出的中等技能工人，更增加了对高技能工人的需求。工业智能化发展程度较高的地区，在发展智能制造过程中承担了一系列非常规创新型任务，包括智能计算机和控制设备的设计、智能检测与生产线的优化升级等任务。这些工作强烈依赖于程序工程师和其他相关研发人员的高超技术能力和对智能制造技术高度的理解和运用能力。另一方面，持续产生的新的创新型任务进一步增加了对工程型、技术型和技能型人才的需求。

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引文和下载附件出处。

引用示例：

参考文献引用范例：

[1] 朱军. 技术吸收、政府推动与中国全要素生产率提升[J].中国工业经济.2017,(1):5-24.

如果研究中使用了未在《中国工业经济》纸质版刊发、但在杂志网站上正式公开发表的数字内容（包括数据、程序、附录文件），请务必在研究成果正文中注明：

数据(及程序等附件)来自朱军(2017),参见在《中国工业经济》网站(http://www.ciejournal.org)附件下载。