

# 《自动化与新任务：技术如何取代并重新安置 劳动力》在线附录

达龙·阿西莫格鲁与帕斯夸尔·雷斯特雷波

2019年3月5日

本附录包含四个部分。第1节正式提出我们的理论框架，并推导出劳动力需求变化的表达式。第2节详细说明我们的实证分析过程。第3节呈现额外发现、分解分析及稳健性检验。第4节描述所用数据来源。

## A1 理论

本小节详细阐述模型框架，补充正文讨论内容。

### 完整模型描述

设该部门的生产水平为 $Y$ 。生产过程通过组合若干任务实现，各任务权重归一化为1，采用以下生产函数：

$$(A1) \quad Y = \left( \sum_{n=1}^N Y_n^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}},$$

其中 $Y_n$ 表示任务 $n$ 在 $[N-1, N]$ 区间内的产出， $\sigma \geq 0$ 为任务间的替代弹性。

任务可通过资本或劳动力生产，其生产函数为：

$$Y_n(z) = \begin{cases} A^L \gamma^L(z) l(z) + A^K \gamma^K(z) k(z) & \text{当 } z \text{ 属于 } [N-1, N] \text{ 区间时} \\ A \gamma'(z) l(z) & \text{当 } z \in (I, N] \text{ 时。} \end{cases}$$

我们用

$$L = \int_{N-1}^N l(z) dz \quad \text{以及} \quad K = \int_{N-1}^N k(z) dz,$$

暂且将它们视为已知量。

如正文所述，我们假设在所有自动化任务中使用资本是成本最优的（详见下一小节）。

参照Acemoglu和Restrepo（2018a）的推导步骤，可将经济均衡产出表示为：

$$(A2) \quad Y(L, K; \theta) = \left( \int_{N-1}^N \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz \right)^{\frac{1}{\sigma}} (A^K K)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left( \int_I \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz \right)^{\frac{1}{\sigma}} (A^L L)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}.$$

因此，文本中定义的生产任务内容表达式为

$$(A3) \quad \Gamma(I, N) = \frac{\int_I \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz}{\int_{N-1}^I \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz + \int_I \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz}.$$

TFP项可表示为

$$\Pi(I, N) = \left( \int_{N-1}^I \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz + \int_I \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz \right)^{\frac{1}{1-\sigma}}.$$

劳动份额直接源自方程(A2)的表达式。由于采用CES结构，劳动份额可简化为

$$(A4) \quad s^L = \frac{1}{1 + \frac{1 - \Gamma(I, N)}{\Gamma(I, N)} \left( \frac{A^K K}{A^L L} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}.$$

劳动份额也可表示为劳动、资本、要素增效技术以及生产任务内容的函数：

$$(A5) \quad s^L(L, K; \theta) = \frac{1}{1 + \left( \frac{1 - \Gamma(I, N)}{\Gamma(I, N)} \right)^{\frac{1}{\sigma}} \left( \frac{A^K K}{A^L L} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}.$$

## 确保 $I$ 结合的限制条件

如正文所述，我们假设在所有自动化任务中使用资本是成本最优的。确保此假设成立的正式条件由以下公式给出：

$$(A6) \quad \frac{1 - \Gamma(I, N)}{\Gamma(I, N)} \left( \frac{A^L \gamma^L(I)^{\sigma}}{AK \gamma^K(I)} \right) < \frac{K}{L} < \frac{1 - \Gamma(I, N)}{\Gamma(I, N)} \left( \frac{A^L \gamma^L(N)^{\sigma}}{AK \gamma^K(N-1)} \right).$$

当此限制成立时，我们得到

$$(A7) \quad \frac{A^L \gamma^L(I)^{\sigma}}{AK \gamma^K(I)} < \frac{W}{R} < \frac{A^L \gamma^L(N)^{\sigma}}{AK \gamma^K(N-1)},$$

这意味着新的自动化技术（ $I$ 的增加）和新任务（ $N$ 的增加）将提高生产率并被立即采用。当上述假设不成立时的一般情况在Acemoglu和Restrepo（2018a）中进行了详细分析。

## 技术与劳动力需求

本小节阐述自动化变革、新增任务及要素增效技术如何影响单部门模型中的劳动力需求，从而确立正文所述结论。针对资本存量 $K$ 与劳动力存量 $L$ 固定的情形，我们给出以下所有推导过程。

在给定要素利用率 $L$ 和 $K$ 的条件下，该部门的劳动力需求可表示为：

$$(A8) \quad W^d(L, K; \theta) = \frac{Y(L, K; \theta)}{L} \times s^L(L, K; \theta).$$

劳动力需求  $W^d(L, K; \theta)$  对劳动力 $L$ 呈递减关系，对资本 $K$ 呈递增关系。接下来我们将分析不同类型技术对劳动力需求的影响。下文所有表达式均可通过对(A8)求导，再结合(A2)和(A5)推导得出。

自动化（即投资I增加）对劳动力需求的影响由下列公式给出：

$$\frac{\partial \ln W^d(L, K; \theta)}{\partial I} = \frac{\partial \ln Y(L, K; \theta)}{\partial I} \quad (\text{生产率效应})$$

$$+ \frac{1}{\sigma} \frac{1 - s^L(L, K; \theta)}{1 - \Gamma(I, N)} \frac{\partial \ln \Gamma(I, N)}{\partial I} \quad (\text{位移效应})。$$

此外，我们还可以使用方程(A2)来计算生产率效应

作为

$$\frac{\partial \ln Y(L, K; \theta)}{\partial I} = \frac{1}{\sigma - 1} \left( \frac{R}{A^K \gamma^K(I)} \right)^{1-\sigma} \frac{W}{A^L \gamma^L(I)} \left( \frac{R}{A^K \gamma^K(I)} \right)^{\frac{1-\sigma}{\sigma}} \frac{1}{\sigma} > 0。$$

该表达式同时验证了本文中的论点：生产率效应

随工资W的增加而增强（在边际任务中保持劳动生产率 $A^L \gamma^L(I)$ 不变）。

新任务（即N的增加）对劳动力需求的影响由下式给出：

$$\frac{\partial \ln W^d(L, K; \theta)}{\partial N} = \frac{\partial \ln Y(L, K; \theta)}{\partial N} \quad (\text{生产率效应})$$

$$+ \frac{1}{\sigma} \frac{1 - s^L(L, K; \theta)}{1 - \Gamma(I, N)} \frac{\partial \ln \Gamma(I, N)}{\partial N} \quad (\text{恢复效应})$$

其中新任务带来的生产率效应由下式给出

$$\frac{\partial \ln Y(L, K; \theta)}{\partial N} = \frac{1}{\sigma - 1} \left( \frac{W}{A^L \gamma^L(N)} \right)^{1-\sigma} \left( \frac{R}{A^K \gamma^K(N-1)} \right)^{\frac{1-\sigma}{\sigma}} > 0。$$

最后，关于要素增效技术的启示，我们得到

$$\frac{\partial W^d(L, K; \theta)}{\partial \ln A^L} = s(L, K; \theta) \quad (\text{生产率效应})$$

$$+ \frac{\sigma - 1}{\sigma} (1 - s^L(L, K; \theta)) \quad (\text{替代效应})，$$

$$\frac{\partial W^d(L, K; \theta)}{\partial \ln A^K} = (1 - s^L(L, K; \theta)) \quad (\text{生产率效应})$$

$$+ \frac{1 - \sigma}{\sigma} (1 - s^L(L, K; \theta)) \quad (\text{替代效应})。$$

## 多部门经济

本节阐述技术如何影响多部门模型中的总劳动需求。我们推导出的劳动需求分解

既确立了文本中呈现的分解方法，也为我们的实证分析提供了实证分析的基础。

用  $I$  标记产业， $I$  表示产业集合。我们用  $P_i$  表示第  $i$  部门所生产商品的价格，其要素价格则用

由  $W_i$  和  $R_i$  决定——它们仍满足(A7)中设定的假设。部门  $i$  可用的技术由  $\theta_i = \{L_i, N_i, A^L, A^K\}$  概括，

其中  $L_i$  和  $K_i$  分别表示各产业使用的劳动力和资本量，

因此部门  $i$  的产出（增加值）为  $Y_i = Y(L_i, K_i; \theta_i)$ 。此外，

劳动力与资本的比较优势表  $\gamma_i^L$  和  $\gamma_i^K$  为：

同样属于该产业的技术范畴，但正如文本所述，我们在此将其视为固定量。我

我们用  $\Gamma_i = \Gamma(N_i, L_i)$  表示第  $i$  部门的任务内容及其

劳动力份额由  $s_i^L$  决定。经济中的总增加值（GDP）为  $Y = \sum_{i \in I} P_i Y_i$ ，

我们定义  $\chi_i = \frac{P_i Y_i}{Y}$  为部门  $i$  在总增加值中的份额。最后，

我们用  $s^L$  表示全经济劳动份额。

全社会工资总额  $WL$  的变化可精确分解为

为

(A9)

$$\begin{aligned}
 d \ln(WL) = & d \ln Y && \text{(生产率效应)} \\
 & + \sum_{i \in I} \frac{s_i^L}{s^L} \frac{d \chi_i}{\chi_i} && \text{(合成效应)} \\
 & + \sum_{i \in I} l_i \frac{1 - s_i^L}{1 - \Gamma_i} d \ln \Gamma_i && \text{(更改任务内容)} \\
 & + \sum_{i \in I} l_i (1 - \sigma) (1 - s_i^L) (d \ln W_i / A^L - d \ln R_i / A^K) && \text{(替代效应)}
 \end{aligned}$$

其中  $l_i = \frac{W_i L_i}{WL}$  表示第  $i$  部门产生的工资总额占比。请注意

此推导并不要求各产业间价格均等，因此可兼容多种不同假设，包括要素流动性、

异质性劳动力类型及要素报酬的决定机制。此外，

适用于任何环境变化，尽管我们重点关注由向量  $\theta = \{\theta_i\}_{i \in I}$  概括的技术变化。

接下来我们将推导该分解公式。需注意工资

可表示为

$$WL = \sum_{i \in I} W_i L_i = \sum_{i \in I} P_i Y_i s_i^L = \sum_{i \in I} Y \chi_i s_i^L$$

此处， $P_i$ 是第*i*部门的价格（以最终产品*Y*计价）， $Y_i$ 是该部门的产出。

对该表达式进行全微分，可得

$$dW \cdot L + W \cdot dL = \sum_{i \in I} dY \cdot \chi_i s^L + \sum_{i \in I} Y \cdot d\chi_i \cdot s^L + \sum_{i \in I} Y \chi_i \cdot ds^L。$$

将两边同时除以 $WL$ ，利用 $\chi_i (= \frac{P_i Y_i}{Y})$ 和 $s^L (= \frac{W_i L_i}{Y})$ 的定义，

并重新排列，得到

$$\frac{dW}{W} + \frac{dL}{L} = \sum_{i \in I} \frac{dY}{Y} \cdot \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{P_i Y_i}{WL} \cdot \frac{W_i L_i}{Y_i} (+) \sum_{i \in I} \frac{Y_i}{WL} \cdot \frac{d\chi_i}{\chi_i} \cdot \frac{W_i L_i}{Y_i} (+) \sum_{i \in I} \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{P_i Y_i}{WL} \cdot \frac{d s^L}{s^L}。$$

现在消去重复项并利用 $l_i$ 的定义 ( $= \frac{W_i L_i}{Y}$ )，我们得到

$$\frac{dW}{W} + \frac{dL}{L} = \sum_{i \in I} \frac{dY}{Y} \cdot l(i) + \sum_{i \in I} \frac{s^L}{s^L} \cdot d\chi(i) + \sum_{i \in I} l(i) \cdot \frac{ds^L}{s^L}。$$

接着注意到 $\frac{dY}{Y} = d \ln x$ ，且 $\sum_{i \in I} l_i = 1$ ，该表达式可写为

为

$$d \ln W + d \ln L = d \ln Y + \sum_{i \in I} \frac{s^L}{s^L} \cdot d\chi_i + \sum_{i \in I} l_i \cdot d \ln s^L。$$

最后，对(A4)求导，得

$$(1 - s^L) \frac{d \ln s^L}{1 - \Gamma_i} = \frac{i}{1 - \Gamma_i} d \ln \Gamma_i + (1 - \sigma)(1 - s^L)(d_i \ln W_i / A^L - d \ln R_i / A^K)。$$

将此代入前式，得出(A9)。

如推导所示，方程(A9)中的分解具有相当普遍性。推导过程中，我们无需对要素跨部门流动性、投入产出关联性或消费者需求侧（关于不同商品类型的边际替代率）作出任何假设。该分解还能容纳不同行业雇佣不同类型劳动力以及特定类型的劳动力市场缺陷。唯一（且关键）的假设是：企业位于其劳动力需求曲线上，因此在每个行业中我们有： $W(i) L(i) = P(i) Y(i) s^L$ 该关系在企业处于需求曲线任意位置时均成立。

是企业位于其劳动力需求曲线上，因此每个行业都满足 $W_i \leq L_i \leq P_i Y_i s^L$ 。当劳动份额等于产出对劳动的弹性时，该条件即成立。

## 替代生产函数

假设替代 (A1) 条件, 采用以下部门生产函数:

函数

$$Y_i = N_i^{1-\sigma} \left( \int_0^N Y_i(z)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} dz \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}},$$

这意味着新任务不会取代旧任务, 而是在生产过程中额外使用。

参照Acemoglu和Restrepo (2018a) 的推导步骤, 基于此生产函数可得: 产出仍由正文中的方程给出, 但现在

$$\Gamma(I, N) = \frac{\int_I \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz}{\int_0^I \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz + \int_I^N \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz}$$

给出生产任务的内容和

$$\Pi(I, N) = \left( \int_0^I \gamma^K(z)^{\sigma-1} dz + \int_I^N \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz \right)^{\frac{1}{\sigma-1}}$$

与我们迄今所做的主要区别在于, 现在新任务对产出的影响由以下公式给出:

$$\frac{dY_i}{dN_i} = \frac{1}{\sigma} \left( \int_0^N \gamma^L(z)^{\sigma-1} dz \right)^{\frac{1}{\sigma}-1} (A_i L_i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \frac{\gamma^L(N)^{\sigma-1}}{N_i} - \frac{1}{\sigma} \frac{Y_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{N_i}$$

$$\frac{d \ln Y_i}{dN_i} = \frac{1}{(\sigma-1)N_i} \left[ \frac{f(W_i)}{A_i \gamma^L(N_i)} \right]^{1-\sigma} \square$$

只要新任务中的有效工资低于1, 新任务就会持续增加产出。

## A2 实证分析细节

本节描述了如何运用上一节提出的分解方法来估计生产率、组合与替代效应以及生产任务内容的变化。

### 生产率与组合效应

方程(A9)展示了工资总额的微小 (无限小) 变化如何分解为生产率效应、结构效应、替代效应以及

生产任务内容的变化。现阐述如何运用此理论成果分解工资总额的 *离散变化*。如正文所述，为消除不同时期人口差异变化的影响，我们始终采用总人口对全经济体工资总额进行标准化处理。

本小节将阐明工资总额变化如何分解为生产率效应、产业结构效应及产业劳动份额变化。随后的小节则将展示产业劳动份额变化如何进一步分解为替代效应与生产任务内容变化。

我们用  $t$  表示时间，单位为年。令  $t_0$  表示分解的起始年份。由于全经济范围的工资总额是各行业工资总额之和，故有：

$$\ln(W_t L_t) = \ln(Y_t \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L)$$

$$\ln(W_{t_0} L_{t_0}) = \ln(Y_{t_0} \sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L) .$$

我们可将按人口标准化后的工资总额百分比变化表示为：

$N_t$ ，在  $t_0$  与  $t$  之间为

$$(A11) \quad \ln\left(\frac{W_t L_t}{N_t}\right) - \ln\left(\frac{W_{t_0} L_{t_0}}{N_{t_0}}\right) = \ln\left(\frac{Y_t}{N_t}\right) - \ln\left(\frac{Y_{t_0}}{N_{t_0}}\right)$$

$$+ \ln\left(\sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L\right) - \ln\left(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L\right)$$

$$+ \ln\left(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L\right) - \ln\left(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L\right) .$$

方程(A11)的第一行代表人均GDP的变化，这直接对应于我们的生产率效应（方程(A9)中的项  $\ln Y$ ）。因此，我们生产率效应的实证对应物是

$$\text{生产率效应}_{t_0,t} = \ln\left(\frac{Y_t}{N_t}\right) - \ln\left(\frac{Y_{t_0}}{N_{t_0}}\right) .$$

方程(A11)的第二行反映了部门结构变化（ $\chi_{i,t}$  随时间变化）对劳动力需求的影响，同时保持各行业内部的劳动力份额不变。从概念上讲，这对应于结构效应



(项  $\sum_i \frac{s_{i,t}^L}{s_t^L} d\chi_i$  在方程(A9)中)。因此,我们测量混合效应为

$$\text{组合效应}_{i,t} = \ln \left( \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L \right) - \ln \left( \sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L \right).$$

为进一步阐明经验测量的成分效应与方程(A9)之间的关联,我们采用一阶泰勒展开式展开前一表达式,特别是将  $\ln(\sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L)$  展开为

$\ln(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L)$  进行展开,可得

$$\begin{aligned} \text{组合效应}_{i,t} &\approx \frac{1}{\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L} \left( \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L - \sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L \right) \\ &= \sum_i \frac{s_{i,t}^L}{\sum_j \chi_{j,t_0} s_{j,t}^L} (\chi_{i,t} - \chi_{i,t_0}). \end{aligned}$$

该近似表明,正如方程(A9)第二行所示,产业结构效应的实证对应物等于GDP部门份额变化的加权和。两种情况下,权重均反映了某部门相对于其他部门的劳动密集程度。

最后,第三项反映了劳动力份额内部变化的作用。部门(随时间变化的  $s_{i,t}^L$ ) 对劳动力需求的影响,在保持部门份额不变的情况下保持不变。从概念上讲,这相当于替代效应与任务内容变化的综合效应。正如文本所述,在竞争性市场中,劳动份额的变化仅源于替代效应和生产任务内容的变化。

## 替代效应与生产任务内容的估计

通过另一阶泰勒展开式,特别是展开  $\ln(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L)$

以  $\ln(\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L)$  为中心展开,方程(A11)中的第三项可表示为

$$\begin{aligned} \ln \left( \sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t}^L \right) - \ln \left( \sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L \right) &\approx \sum_i \frac{\partial \ln(\sum_j \chi_{j,t_0} s_{j,t}^L)}{\partial \ln s_{i,t_0}^L} (\ln s_{i,t}^L - \ln s_{i,t_0}^L) \\ &= \sum_i \frac{\chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L}{\sum_j \chi_{j,t_0} s_{j,t_0}^L} \cdot (\ln s_{i,t}^L - \ln s_{i,t_0}^L) \\ &= \sum_i l_{i,t_0} (\ln s_{i,t}^L - \ln s_{i,t_0}^L), \end{aligned}$$

其中最后一行利用了  $\chi_{i,t_0}$   $s_{i,t_0}^L = \frac{W_{i,t_0} L_{i,t_0}}{Y_{i,t_0}}$  因此

$$\frac{\chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L}{\sum_i \chi_{i,t_0} s_{i,t_0}^L} = \frac{W_{i,t_0} L_{i,t_0}}{\sum_i W_{i,t_0} L_{i,t_0}} = \frac{L_{i,t_0}}{L_{i,t_0}}$$

方程(A4)表明, 劳动份额可表示为

有效要素价格与生产任务内容的函数, 即  $s^L = s^L(\rho_{i,t}, \Gamma_{i,t})$ ,  
其中  $\rho_{i,t} = \frac{W_{i,t} A^K}{A^L}$  是劳动的相对有效价格。为进一步分解  
构成行业内劳动份额的百分比变化,  $\ln s^L_{i,t} - \ln s^L_{i,t_0}$ ,

我们采用另一阶泰勒展开, 本次以  $\ln s^L(\rho_{i,t}, \Gamma_{i,t})$  为中心, 在  $\ln s^L(\rho_{i,t_0}, \Gamma_{i,t_0})$  处展开。由此得出:

$$\begin{aligned} \ln s^L_{i,t} - \ln s^L_{i,t_0} \approx & \frac{\partial \ln s^L(\rho_{i,t_0}, \Gamma_{i,t_0})}{\partial \ln \rho_{i,t_0}} \left( \ln \frac{W_{i,t}}{W_{i,t_0}} - \ln \frac{R_{i,t}}{R_{i,t_0}} - g^A_{i,t_0,t} \right) \\ & + \frac{\partial \ln s^L(\rho_{i,t_0}, \Gamma_{i,t_0})}{\partial \ln \Gamma_{i,t_0}} (\ln \Gamma_{i,t} - \ln \Gamma_{i,t_0}), \end{aligned}$$

其中  $g^A_{i,t_0,t}$  是  $t_0$  与  $t$  之间  $A^L/A^K$  的增长率。根据方程 (A4),

可得

$$\frac{\partial \ln s^L(\rho_{i,t_0}, \Gamma_{i,t_0})}{\partial \ln \rho_{i,t_0}} = (1 - \sigma)(1 - s^L_{i,t_0}), \quad \frac{\partial \ln s^L(\rho_{i,t_0}, \Gamma_{i,t_0})}{\partial \ln \Gamma_{i,t_0}} = \frac{(1 - s^L_{i,t_0})}{1 - \Gamma_{i,t_0}},$$

因此我们得到近似式

$$\begin{aligned} (A12) \quad \ln s^L_{i,t} - \ln s^L_{i,t_0} \approx & (1 - \sigma)(1 - s^L_{i,t_0}) \left( \ln \frac{W_{i,t}}{W_{i,t_0}} - \ln \frac{R_{i,t}}{R_{i,t_0}} - g^A_{i,t_0,t} \right) \\ & + \frac{(1 - s^L_{i,t_0})}{1 - \Gamma_{i,t_0}} (\ln \Gamma_{i,t} - \ln \Gamma_{i,t_0}), \end{aligned}$$

第一行是行业*i*的替代效应。第二行代表生产任务内容的变化, 在我们的模型中, 这些变化是由自动化和行业*i*中新增任务驱动的。

根据方程(A12), 我们计算行业*i*中*t*<sub>0</sub>与*t*之间的替代效应为

$$\text{替代效应}_{i,t_0,t} = (1 - \sigma)(1 - s^L_{i,t_0}) \left( \ln \frac{W_{i,t}}{W_{i,t_0}} - \ln \frac{R_{i,t}}{R_{i,t_0}} - g^A_{i,t_0,t} \right) \circ$$

我们使用来自美国劳工统计局 (BLS) 的要素价格数据 (详见数据部分的描述)

本附录)。我们为 $\sigma$ 设定基准值0.8，并采用不同的估计值

用于 $g_{i,t_0,t}^A$ 如正文所述。

$g$  在获得行业层面的替代效应估计值后，我们将行业在 $t_0$ 至 $t$ 期间任务内容的变化量定义为方程 (A12) 的残差项：

$$\text{任务内容变化}_{i,t_0,t} = \ln s_{i,t}^L - \ln s_{i,t_0}^L - (1-\sigma)(1-s_{i,t_0}^L) \left( \ln \frac{W_{i,t}}{W_{i,t_0}} - \ln \frac{R_{i,t}}{R_{i,t_0}} - g_{i,t_0,t}^A \right).$$

替代效应对整个经济的影响由下列公式给出：

$$\text{替代效应}_{t_0,t} = \sum_{i \in I} l_{i,t_0} \text{替代效应}_{i,t_0,t},$$

这直接对应于方程(A9)中理论分解的第四行。最后，通过汇总各行业层面的任务内容变化，计算出整个经济体生产任务内容的变化：

$$\text{任务内容变化}_{t_0,t} = \sum_{i \in I} l_{i,t_0} \text{任务内容变化}_{i,t_0,t}.$$

## 位移与恢复

我们可以进一步将任务内容的变化分解为置换效应和恢复效应。为此，我们假设（如正文所述），在五年时间窗口内，一个行业要么进行自动化改造，要么创造新任务，但不会同时开展这两项活动。该假设意味着

$$\begin{aligned} \text{(A14) 置换效应}_{t-1,t} &= \sum_{i \in I} l_{i,t_0} \min \left( 0, \frac{1}{5} \sum_{\tau=t-2}^{t+2} \text{修改任务内容}_{i,\tau-1,\tau} \right) \text{修改任} \\ \text{替代效应}_{t-1,t} &= \sum_{i \in I} l_{i,t_0} \max \left( 0, \frac{1}{5} \sum_{\tau=t-2}^{t+2} \text{务内容}_{i,\tau-1,\tau} \right). \end{aligned}$$

通过将这些表达式在 $t_0$ 和 $t$ 上累积，我们可以计算位移和复位效应的总贡献。

## A3 补充实证发现

本节将阐述补充实证结果及稳健性检验。

## 要素增益技术的作用

图A1展示了我们对1947-1987年及1987-2017年数据采用dif-

对于术语  $g^L$  的不同假设  $i, t, t_0$  —— 劳动力增强型

相对于资本增效技术。当我们设定不同的要素增效技术变革增长率时，观察到的差异非常微小。

更具说服力的是另一项补充分析：当我们计算行业层面所需的技术增效变化时，这些变化足以解释行业劳动份额的变动——前提是生产任务内容保持不变（且不存在技术退化）。这进一步印证了技术增效因素在美国经济中解释劳动力需求变化的作用有限。

假设任务内容未发生变化——因此不存在真正的替代效应和恢复效应。由此，某行业劳动力份额的观测变化必须归因于要素增产技术进步（即  $A^L$  和  $A^K$  项不能下降，只能上升）。或保持不变）。特别地，我们可将解释劳动份额观测变化所需的要素增益技术增长率表示为：

$$\ln A^L_{i,t} - \ln A^L_{i,t_0} = \left( \frac{1}{\sigma - 1}(1 - s^L_{i,t_0}) \right) \times \text{位移}_{i,t_0,t} > 0$$

且

$$\ln A^K_{i,t} - \ln A^K_{i,t_0} = \left( \frac{1}{1 - \sigma}(1 - s^L_{i,t_0}) \right) \times \text{恢复}_{i,t_0,t} > 0.$$

在额外假设不存在扭曲的情况下，我们可以进一步推导出

运用包络定理可得出结论：当  $L$  值增加时， $A^L$  的改进程度呈递增趋势。 $i, t$

TFP的提升量

为(A15)

$$s^L_{i,t_0} \times \text{位移}_{i,t,t_0} > 0,$$

$$A^L \text{ 对 } TFP_{i,t} \text{ 的贡献}_0 = \sum_i \chi_{i,t_0} \left( \frac{1}{\sigma - 1}(1 - s^L_{i,t_0}) \right)$$

以及  $A^K$  的改进  $i, t$  使全要素生产率提高

(A16)

$$A^K \text{ 对 } TFP_{i,t} \text{ 的贡献}_0 = \sum_i \chi_{i,t_0} \left( \frac{1 - s^L_{i,t_0}}{1 - \sigma}(1 - s^L_{i,t_0}) \right) \times \text{恢复}_{i,t,t_0} > 0.$$

图A2展示了若劳动力替代效应由劳动力要素生产率提升解释，而资本要素生产率提升解释了资本要素生产率恢复效应时，所有行业应呈现的反事实全要素生产率增长。由此推导出的全要素生产率增幅极为庞大——远超过去七十年间实际观测到的全要素生产率增长水平。要解释1987至2017年间产业劳动份额的显著变化（尤其是制造业劳动份额的下降），必须存在生产要素增效技术的重大变革。该分析强调：要解释部门劳动份额演变及总劳动需求变化，生产任务内容必须发生根本性转变。

## 制造业的衰退

我们的主要发现表明，1987-2017年间制造业自动化进程显著加速。在此期间，制造业工资总额出现绝对值下降。我们可运用研究框架分析制造业劳动力需求下降的根源。

方程(A9)需扩展以纳入制造业产品价格的影响。随后可将总工资支出变化分解为：

$$\begin{aligned}
 d \ln(WL)_{\text{制造}} &= d \ln P_{\text{制造}} && \text{(价格效应)} \\
 &+ d \ln Y_{\text{制造业}} && \text{(生产率效应)} \\
 &+ \sum_{i \in M} (s_i^L - \bar{s}^L) d \chi_i && \text{(产业结构效应)} \\
 &+ \sum_{i \in M} l_i \frac{s_i^L - \bar{s}^L}{1 - \Gamma_i} d \ln \Gamma_i && \text{(更改任务内容)} \\
 &+ \sum_{i \in M} l_i (1 - \sigma)(1 - s_i^L) (d \ln W_i / A_i^L - d \ln R_i / A_i^K) && \text{(替代效应)}
 \end{aligned}$$

其中求和范围现为制造业， $Y_{\text{manuf}}$  表示制造业产出量， $P_{\text{manuf}}$  表示制造业商品的相对价格。

价格效应的产生源于制造业技术进步将降低其相对价格 $P_{\text{manuf}}$ ，从而对该部门的劳动力需求产生负面影响。这是解释经济结构转型的重要机制之一（参见Ngai和Pissarides，2007）。图A3呈现了1947-1987年及1987-2017年制造业的分解结果。

与正文一致，我们将制造业工资总额按

人口进行标准化处理。图表显示，1947至2007年间该行业产量以年均3%的稳定速度增长。然而，根据结构转型理论，由于强烈的价格效应，这并未转化为该行业同等规模的劳动力需求增长——1960年代中期至2007年间，制造业工资总额以每年1.3%的速度持续下降。

更重要的是，我们的分解还表明，除了标准价格效应外，制造业部门任务内容的变化在解释制造业劳动力需求的绝对下降方面也发挥了相当大的作用。在1987-2017年间，自动化替代效应以每年1.1%的速度削减该行业劳动力需求（累计降幅达33%），使替代效应在此期间的重要性与价格效应相当（合计导致40%的累计下降）。在制造业内部，结构效应虽呈负面影响，但其重要性不及替代效应和价格效应，1987-2017年间每年仅使劳动力需求减少不到0.3%（累计减少9%）。

## 自动化与新任务的相关性

我们通过系列图表补充了正文表1所呈现的证据。

图A4直观呈现了我们用于衡量自动化程度的三项指标与任务内容变化之间的关联。图A4的第四个面板还展示了外包与生产任务内容变化指标之间的关系。尽管这两个变量存在相关性，但显然存在大量与外包无关的任务内容变化。图A5以可视化形式呈现了我们用于衡量新任务的四个代理变量与任务内容变化之间的关系。

最后，表A1显示任务内容的总变化量（即某行业中替代效应与恢复效应绝对值之和）预示着行业产出增长（第1、2列）和全要素生产率提升（第3、4列）。这两项相关性均支持我们的解读：生产任务内容的变化预示着自动化进程或新任务创造正在发生，从而提升生产率。在第5和第6列中，我们考察了行业技能密集度，该指标通过技能密集度占比衡量。

---

<sup>1</sup>这两项指标均可从美国商务部经济分析局KLEMS行业账户中获取，用于我们分析的61个行业。

在所有雇员中拥有大学学历的工人比例（数据源自1990年人口普查及2012-2016年美国社区调查）。经历更多岗位替代或恢复的行业也正变得更依赖技能。这一发现的自然解释是：自动化技术主要替代了低技能工人，而新增任务则主要惠及高技能劳动力（这符合Acemoglu和Restrepo在2018a年论文中的理论预测）。

## 稳健性检验

我们还进行了一系列稳健性检验。

图A6检验了解析顺序是否影响结果。

方程(A11)中的工资支出（首先考虑产业内变化，其次考虑产业结构效应）至关重要。图中展示了颠倒此顺序——先进行产业内变化调整，再考虑产业结构效应——所得的结果。在此替代分解中，方程(A11)呈现如下形式：

$$(A18) \quad \ln \left( \frac{W_t L_t}{N_t} \right) - \ln \left( \frac{W_{t0} L_{t0}}{N_{t0}} \right) = \ln \left( \frac{Y_t}{N_t} \right) - \ln \left( \frac{Y_{t0}}{N_{t0}} \right) \\ + \ln \left( \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L \right) - \ln \left( \sum_i \chi_{i,t0} s_{i,t0}^L \right) \\ + \ln \left( \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t0}^L \right) - \ln \left( \sum_i \chi_{i,t0} s_{i,t0}^L \right),$$

其中第二行代表行业内部劳动份额变化的作用，最后一行在此情况下是结构效应。

遵循与之前相同的步骤，我们发现按此排序时，替代效应的总体贡献为

$$\text{替代效应}_{t0,t} = \sum_{i \in I} \frac{\chi_{i,t} s_{i,t}^L}{\sum_{j \in I} \chi_{j,t} s_{j,t}^L} \text{替代效应}_{i,t0,t}$$

生产任务内容的整体经济变化为

$$\text{任务内容变化}_{t0,t} = \sum_{i \in I} \frac{\chi_{i,t} s_{i,t0}^L}{\sum_{j \in I} \chi_{j,t} s_{j,t0}^L} \text{修改任务内容}_{i,t0,t}$$

组合效应由以下公式给出

$$\text{组合效应}_{i,t} = \ln \left( \sum_i \chi_{i,t} s_{i,t}^L \right) - \ln \left( \sum_i \chi_{i,t0} s_{i,t0}^L \right).$$

从图A6中可以看出，结果与我们的基准情况非常相似。

图A7基于劳工统计局数据，对整个经济体（含自营收入）的工资总额进行了分解。该数据涵盖60个行业。劳工统计局采用的插补（含自营职业收入）的分解。这些数据涵盖60个行业。关于劳工统计局采用的插补程序详情，参见Elsby等人（2013）。结果与正文所述结果相似。

图A8呈现了替代效应与恢复效应的估计值通过任务内容的年度变化进行分析。为便于比较，我们同时呈现了文本中使用的五年移动平均值。如预期所示，隐含的替代效应和恢复效应更为显著，但整体模式相似。我们发现过去三十年间替代效应持续增强，而恢复效应则逐渐减弱。

图A9、A10和A11展示了1947-1987年期间采用不同替代弹性系数 $\sigma$ 值的分解结果，而图A12、A13和A14则对应1987-2017年期间的分解结果，分别采用不同替代弹性 $\sigma$ 值；图A12、A13和A14则对应1987-2017年分解结果。不同替代弹性值下的分解结果高度一致。

## A4 数据来源

现提供正文及本附录所用各类数据的来源。

汇总数据：我们采用来自FRED的美国经济就业、人口及个人消费支出（PCE）价格指数汇总数据。

1987-2017年数据：我们采用美国商务部经济分析局（BEA）1987-2017年按行业划分的国内生产总值（GDP）数据。这些数据包含61个私营行业（19个制造业和42个非制造业）的增加值和劳动者报酬信息，行业划分依据2007年北美行业分类系统（NAICS）。

价格数据源自劳工统计局（BLS）的多要素生产率表，该表为各行业提供劳动力报酬与资本收入指标，以及劳动力使用量、劳动力构成和资本使用量的指数。BLS据此估算劳动力价格指数——工资 $W_{i,t}$ ——如下：

$$\Delta \ln W_{i,t} = \Delta \ln Y_{i,t}^L - \Delta \ln L_{i,t}^{qty} - \Delta \ln L_{i,t}^{comp},$$



其中  $Y_{i,t}^L$  表示行业  $i$  的工人薪酬， $L^{qv}$  表示数量指数。

劳动力使用量（以全职等效工人计）， $L^{comp}$  表示劳动力构成指数（根据工人的人口统计特征进行调整）。

劳工统计局还估算了资本使用价格指数——即租金率  $R_{i,t}$ ——如下：

$$\Delta \ln R_{i,t} = \Delta \ln Y_{i,t}^K - \Delta \ln K_{i,t}^{qv},$$

其中  $Y_{i,t}^K$  表示行业  $i$  的资本收入， $K_{i,t}^{qv}$  表示该行业的资本量指数。

所使用的资本量，该数据由投资数据（经量化调整）通过永续盘存法构建而成。劳

工统计局通过从总产出中扣除劳动力、能源、

因此，根据构造逻辑， $Y_{i,t}^K + Y_{i,t}^L$

共同构成产业  $i$  的全部增加值。

在1987-2017年的分解分析中，我们采用美国劳工统计局（BLS）测算的  $W_{i,t}$  和  $R_{(i,t)}$  指标。需要说明的是，BLS虽提供所有北美行业分类系统（NAICS）行业的数据，但将汽车制造业（NAICS代码）与其他运输设备制造业（NAICS代码）合并统计。分解分析中，我们对这两个行业均采用合并后的价格指数。

1947-1987年数据：我们采用美国经济分析局（BEA）1947-1987年按行业划分的GDP数据。该数据集包含58个行业（依据1977年SIC标准划分，含21个制造业与37个非制造业）的增加值及劳动者报酬信息。我们通过个人消费支出（PCE）价格指数将这些数据转换为不变美元。

由于劳工统计局（BLS）未公布该时期的价格指数，我们参照其方法自行构建。具体而言，劳动力价格指数（即工资  $W_{i,t}$ ）的计算方式为：

$$(A19) \quad \Delta \ln W_{i,t} = \Delta \ln Y_{i,t}^L - \Delta \ln L_{i,t}^{qv}$$

其中  $Y_{i,t}^L$  表示行业  $i$  的劳动者报酬， $L^{qv}$  表示

劳动力使用量指数（以全职当量工人计）。这两项指标均源自美国经济分析局（BEA）的行业账户。与劳工统计局（BLS）的工资指数不同，我们1947-1987年的工资指数未对劳动者构成进行调整。

其次，我们构建了资本使用价格指数——即租金率

$R_{i,t}$ —如下：

$$(A20) \quad \Delta \ln R_{i,t} = \Delta \ln(Y_{i,t} - Y^L) - \Delta \ln K^{qty}_{i,t}$$

其中  $Y_{i,t} - Y^L$  表示行业  $i$  的资本收入，该值遵循美国劳工统计局（BLS）

我们将其计算为增加值减去劳动力成本。此外， $K^{qty}_{i,t}$  是

所用资本量，我们从按行业划分的国民收入和产品账户（NIPA）固定资产表中获取。这些表格为每个行业提供了一个折旧后净资本指数，该指数基于投资数据（经量化调整）采用永续盘存法构建而成。我们采用的是总资产指数，但该数据还包含设备、知识产权和建筑物的专项指数。国民经济核算数据的聚合层级与美国经济分析局数据略有差异。为解决此问题，我们将数据整合为43个合并行业（18个制造业与25个非制造业），确保通过这两个数据源可实现时间序列的连续追踪。

。

替代效应与任务内容变化的替代计算方法：我们对行业内部替代效应及任务内容变化的基础估计，需要同时估算  $W_{i,t}$  与  $R_{i,t}$

以及  $\sigma$  和要素增效技术增长率  $g^A_{i,t,t0}$ 。

仅利用行业  $i$  中劳动力与资本投入量的数据，结合要素增效技术增长率的估计值，即可等效估算替代效应与任务内容变化。

技术， $g^A_{i,t,t0}$ 。特别是，替代效应和

$$(A21) \quad \begin{aligned} \text{替代} \quad \Delta \ln R_{i,t,t0} &= (1 - \sigma) \ln \frac{S^L_{i,t}}{S^L_{i,t0}} - (1 - \sigma)(1 - s^L_{i,t0}) \left( \ln \frac{L_{i,t}}{L_{i,t0}} - \ln \frac{K_{i,t}}{K_{i,t0}} \right) + g^A_{i,t,t0} \\ \text{任务内容} \quad \Delta \ln R_{i,t,t0} &= \sigma \ln \frac{S^L_{i,t}}{S^L_{i,t0}} + (1 - \sigma)(1 - s^L_{i,t0}) \left( \ln \frac{L_{i,t}}{L_{i,t0}} - \ln \frac{K_{i,t}}{K_{i,t0}} \right) + g^A_{i,t,t0} \end{aligned}$$

这种等价关系表明，人们可以利用要素价格数据或各行业资本与劳动的数量指数来实施我们的方法论。只要各行业的价格指数和数量指数满足方程(A19)和(A20)，两种方法论将产生完全相同的结果。

详细制造业数据：在运用《制造业技术调查》进行分析时，我们采用了四位数行业分类的详细数据集。这些行业数据源自美国经济分析局1987年、1992年、1997年、2002年及2007年的投入产出账户。使用这些数据时面临的挑战在于，不同年份采用的行业分类标准存在差异。为解决此问题，我们采用了克里斯蒂娜·帕特森创建的对照表，该对照表将详细行业映射至一套统一的四位数制造业行业分类，依据1987年SIC标准进行划分。

此外，在少数情况下，增加值低于员工薪酬总额，对此我们重新编码使增加值等于员工薪酬总额，确保劳动份额维持在0至1之间。最后，我们采用个人消费支出价格指数将数据转换为不变美元。

针对这些四位数的SIC行业，我们从NBER-CES制造业数据库中计算出资本和劳动力使用量的指数。对于劳动力，我们计算了就业指数，并根据工人构成（生产工人与非生产工人）进行了调整。对于资本，我们采用NBER-CES各行业的实际资本存量指标，该指标基于投资数据（经量化平减处理）采用永续存货法构建。随后运用（A21）公式计算任务内容变化与替代效应。

1850-1910年数据：农业机械化讨论中引用的历史数据源自Budd（1960）表1，见附图A15。我们采用Budd经调整的估计值，该值考虑了该时期自营职业变化因素。Budd（1960）的表A1同时提供了总就业数据。我们采用明尼阿波利斯联邦储备银行的历史价格指数序列，将Budd的估计值转换为1910年美元价值。

如文中所述，农业与工业中工资支出占收入比例的数据源自巴德（1960）。这些数字忽略了归属于农民和企业家的所有者收入，而该部分收入部分属于劳动报酬。约翰逊（1948, 1954）提供了包含所有者收入的20世纪初劳动收入份额估算值。由此得出的1900-1910年劳动份额显示：农业领域劳动份额介于45%至55%（相较于18%的工资份额），而整体经济劳动份额达70%（相较于47%的工资份额）。由于（自营）农业在农业部门的重要性远超其他经济部门的创业活动，当考虑农业劳动密集度与整体经济差异时，该差距将缩小一半。

工资份额)。由于(自耕农)农业在农业部门的重要性远超其他经济部门的创业活动,当同时计入农民与企业家收入时,农业相对于整体经济的劳动密集度差距便缩小一半。

即便进行上述调整,农业仍属相对资本密集型部门——其资本与劳动投入比(含土地)是制造业、贸易及服务业的两倍(Johnson, 1954)。因此,经济活动从农业向制造业、贸易及服务业的转移,再次被认为产生了正向结构效应。尽管对业主收入的调整会影响结构效应的规模,但并不会改变以下结论:在此期间,农业中的劳动份额下降,而制造业、贸易和服务业中的劳动份额上升。这主要是因为,正如巴德(1960)所指出的,在此期间,各行业内业主收入所占比例基本保持不变。

自动化技术的替代指标: *机器人调整后渗透率*的测量方法源自Acemoglu和Restrepo(2018b)。该指标涵盖19个行业,随后被映射至本研究分析的61个行业。

Acemoglu和Autor(2011)提出的*常规职业占比*指标,衡量的是高度易受计算机化和自动化影响的职业比例。常规职业涵盖销售、文书、行政支持、生产及操作类岗位。该指标覆盖243个普查行业,经映射后对应本研究使用的61个行业。

《制造业技术调查》(SMT)的自动化技术采用率数据涵盖1988年与1993年(参见Doms等人,1997)。我们整合两份调查数据,采用采用自动化技术(包括自动导引车)

的企业占比(按就业人数加权)。

车辆、自动存储与检索系统、机械传感器、计算机控制机械、可编程控制器及工业机器人。该指标适用于148个四位数SIC行业,均隶属于以下三位数"技术密集型"制造业:金属制品、非电气机械、电气与电子设备、运输设备以及仪器及相关产品。为充分利用这些细分数据,本模型采用基于BEA投入产出数据计算的1987-2007年间148个四位SIC行业任务内容变化估计值。

新任务的替代指标：1991年《职业名称词典》中按职业划分的新职位名称占比数据源自Lin（2011）。我们通过1990年人口普查中按职业划分的就业占比数据，将该指标映射至61个行业。

新兴任务的职业指标源自O\*NET。自2008年起，O\*NET持续追踪"新兴任务"——即当前未被职业分类收录、但从业者认定在工作中日益重要的任务。与《职业名称词典》数据处理方式一致，我们通过1990年人口普查的职业就业分布数据，将该指标推演至各行业。

最后，两种职业多样性指标均基于1990年人口普查数据与2012-2016年美国社区调查数据计算得出。

离岸外包指标：该指标基于Feenstra和Hanson（1999）的研究成果，并由Wright（2013）进一步扩展。该指标适用于400多个北美行业分类系统（NAICS）行业，我们将其映射至本研究分析的61个行业。该指标针对每个行业，捕捉了1993至2007年间为其提供中间产品的行业间贸易渗透程度。

## 附录参考文献

阿西莫格鲁，达伦与大卫·奥托尔（2011）《技能、任务与技术：对就业与收入的影响》，《劳动经济学手册》第4卷：1043–1171页。

阿西莫格鲁，达伦与帕斯夸尔·雷斯特雷波（2018a）《机器与人的竞赛：技术对增长、要素份额和就业的影响》，《美国经济评论》，108(6): 1488–1542。

埃尔斯比，迈克尔，巴特·霍比恩与艾塞古尔·萨欣（2013）《美国劳动份额的下降》，《布鲁金斯经济活动论文集》，第2期：1–63页。

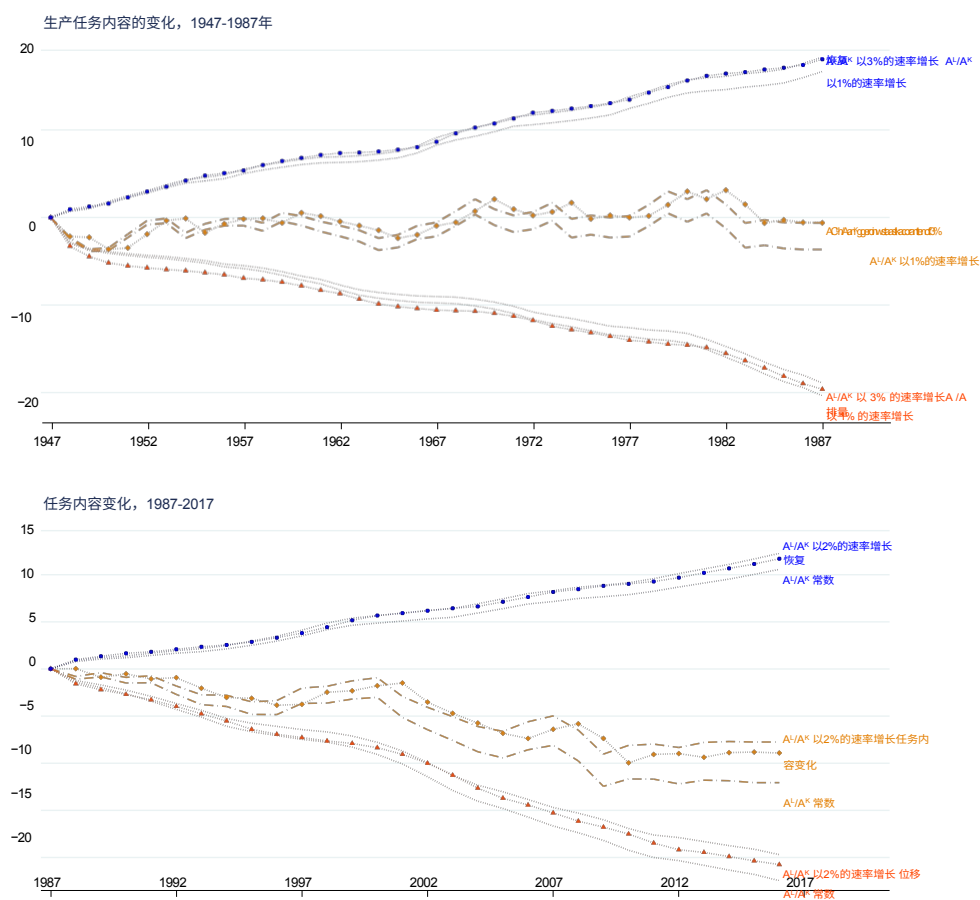
费恩斯特拉，罗伯特，与戈登·汉森（1999）《外包与高科技资本对工资的影响：1979-1990年美国数据估计》。《经济学季刊》，114(3): 907–940。

盖尔·D·约翰逊（1954）《农业收入分配》，《农业经济学杂志》，30(4):724–749。

盖尔·D·约翰逊（1954）《1850-1952年美国收入的功能分配》，《经济学与统计评论》，36(2):175-182。

林杰夫（2011）《技术适应、城市与新型工作》  
《经济学与统计评论》第93卷第2期：554-574页。

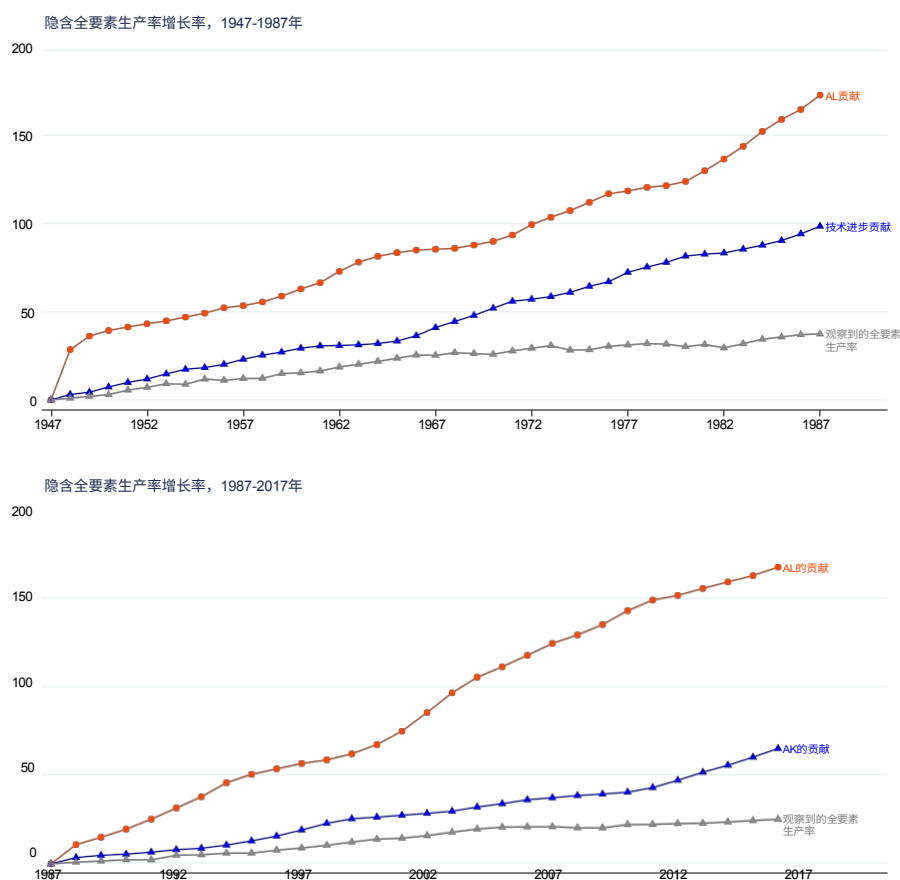
赖特，格雷格（2014）《重新审视离岸外包对就业的影响》，  
《欧洲经济评论》66:63-83。



图A1：不同假设增长率下 $A^L$ 与 $A^K$ 的位移效应与恢复效应估计值。

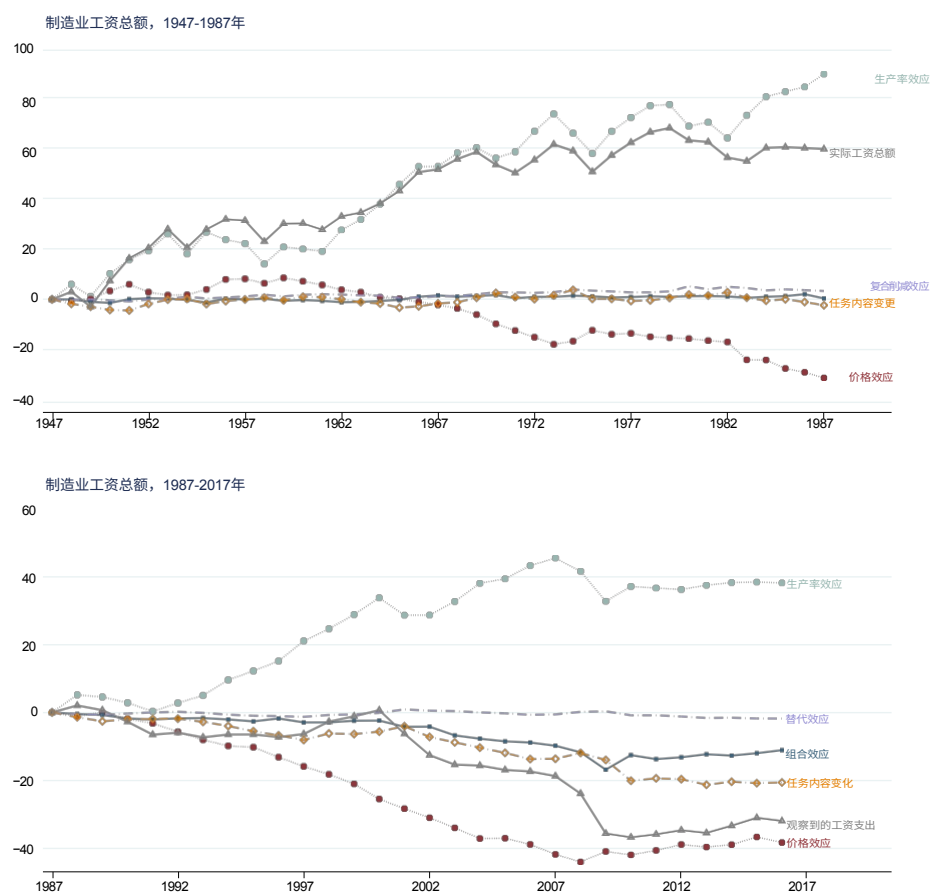
注：本图展示了基于方程(A14)对不同 $A^L$   $A^K$  增长率值的位移效应与恢复效应基准估计。上图对应1947-1987年，作为基准情景，假设相对劳动增效技术变革的增长率为2%。下图展示1987-2017年数据，作为基准情景，假设相对劳动增效技术变革的增长率为1.5%。当替代弹性 $\sigma=0.8$ 时，结果显示替代弹性 $\sigma=0.8$ 的情况。





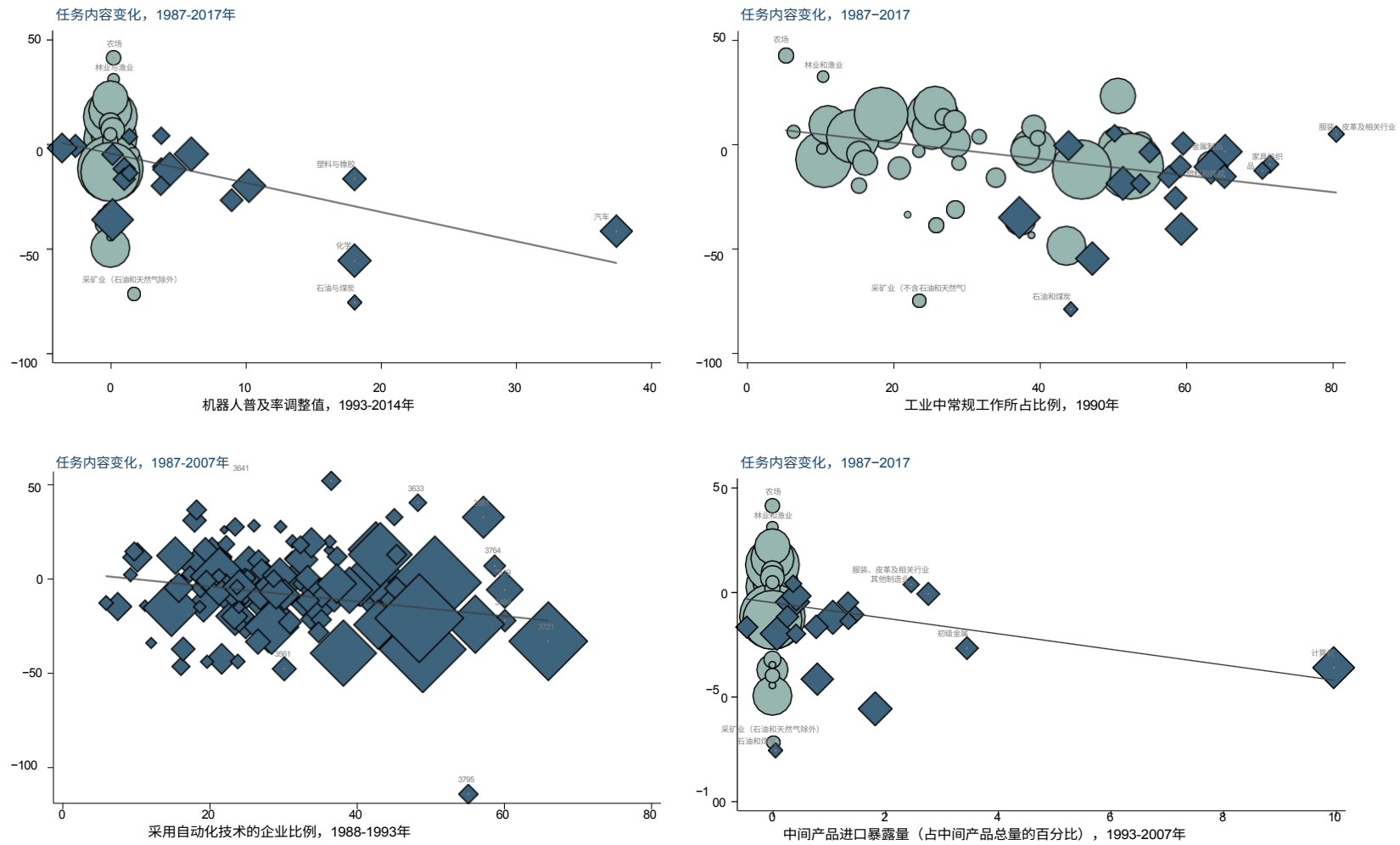
图A2：反事实全要素生产率变化。

注：本图展示了若将1947-1987年及1987-2017年期间的替代效应与恢复效应分别归因于行业层面的劳动增强型与资本增强型技术变革（依据方程(A15)和(A16)推导），所对应的反事实全要素生产率变化。为便于比较，图中同时标注了两个时期内全要素生产率的实际增长值。



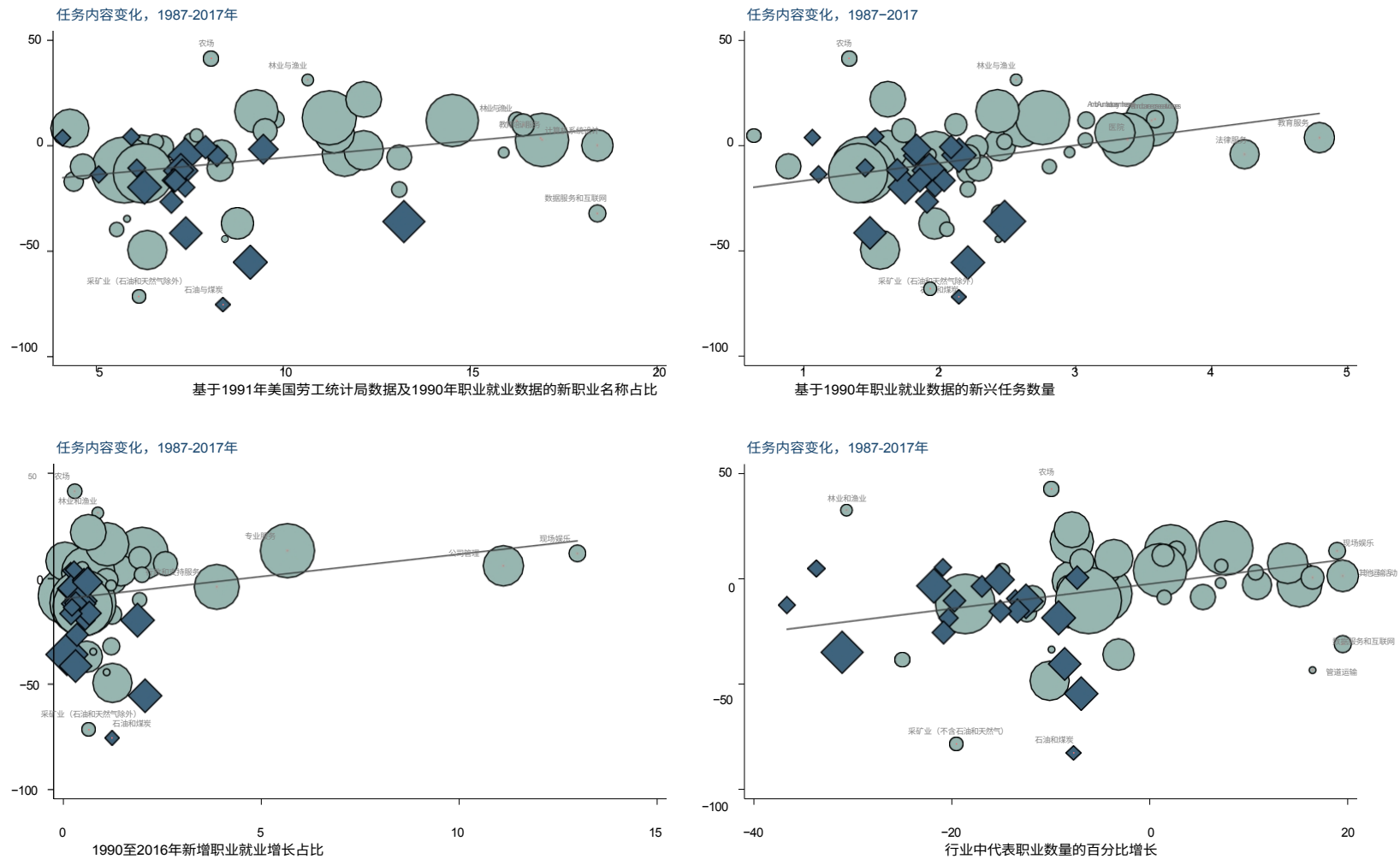
图A3：制造业劳动力需求。

注：本图展示了方程(A3)中推导出的1947-1987年及1987-2017年制造业工资总额分解结果。上图展示1947-1987年数据，假设相对劳动增效技术变革增长率为2%。下图展示1987-2017年数据，假设相对劳动增效技术变革增长率为1.5%。  
替代弹性 $\sigma=0.8$ 时的结果。



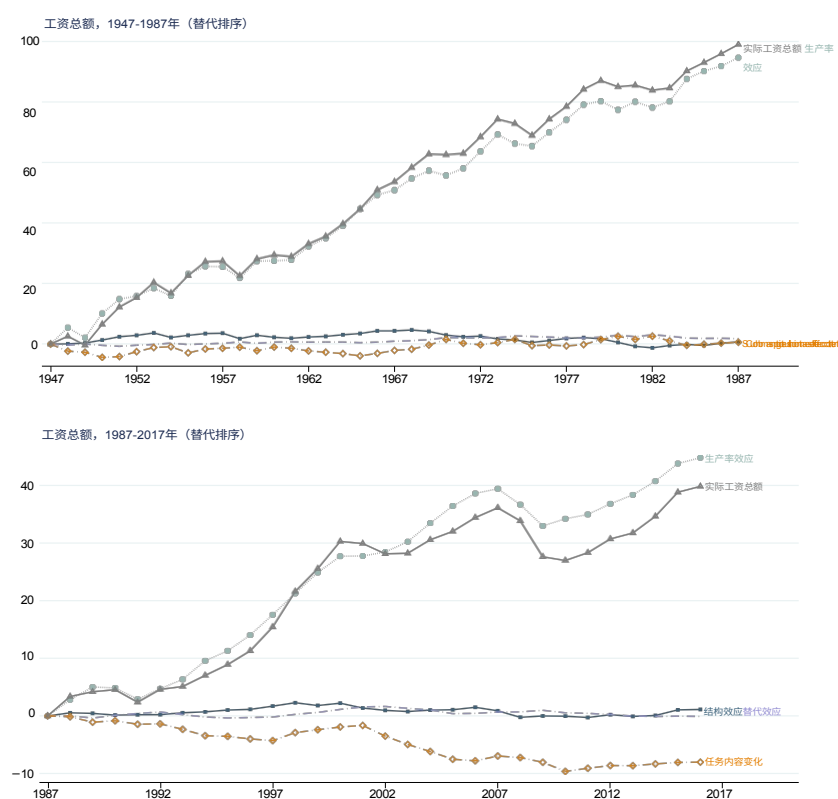
图A4：自动化技术、离岸外包与生产任务内容的变化。

注：各面板展示行业层面任务内容变化与自动化技术或离岸外包指标的双变量关系。菱形标记代表制造业，圆形标记代表非制造业。指标包括：1993-2014年机器人调整渗透率（源自Acemoglu和Restrepo, 2018b）、1990年常规职业就业占比（Acemoglu and Autor, 2011），采用自动化技术的企业占比（按就业人数加权，源自1988年和1993年SMT数据），以及中间品进口暴露度（源自Feenstra and Hanson, 1999）。详见正文说明。



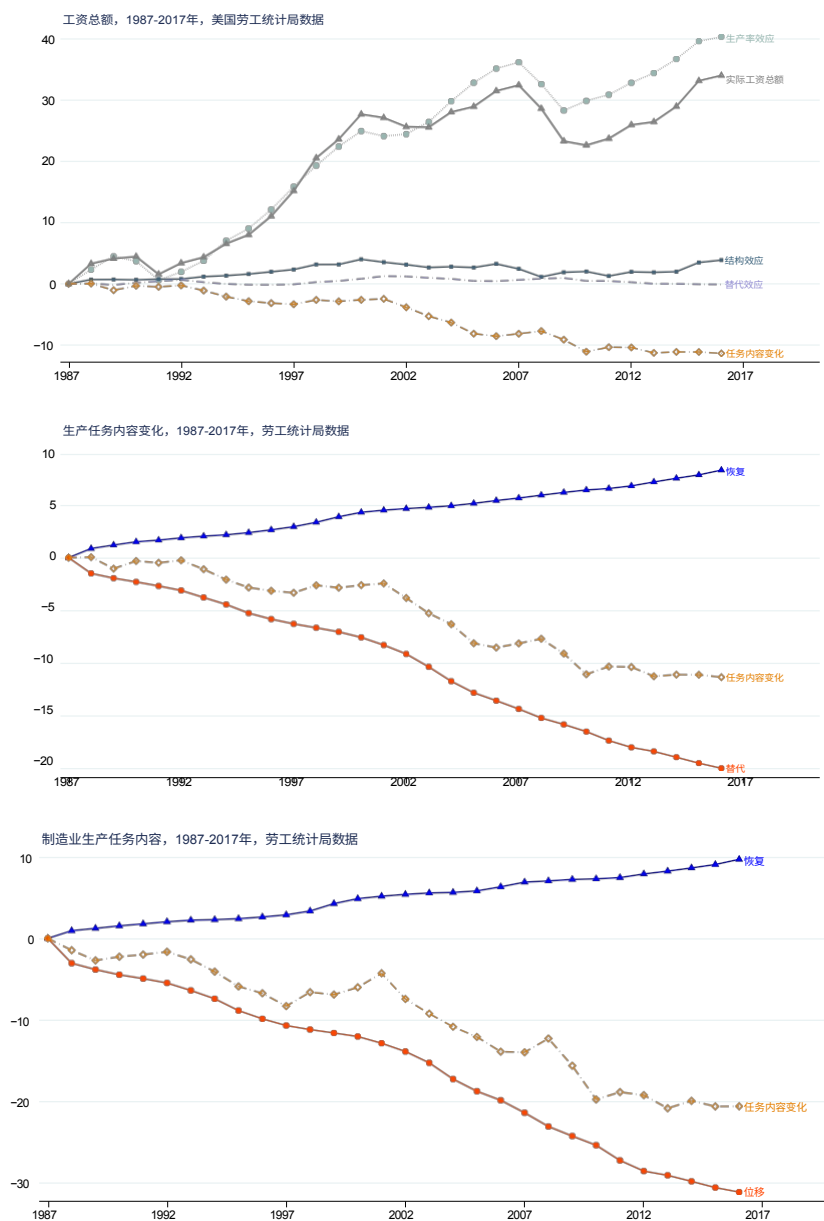
图A5：生产领域新增任务及任务内容变化。

注：每幅图表展示了行业层面任务内容变化与新任务替代指标之间的双变量关系。菱形标记代表制造业，圆形标记代表非制造业。替代指标包括：新职位名称占比（源自Linn, 2011）、新兴任务数量（源自ONET）、1990至2016年间“新兴职业”（即1990年该行业尚未存在的职业）就业增长占比，以及1990至2016年间行业内职业数量的增幅百分比。详见正文说明。



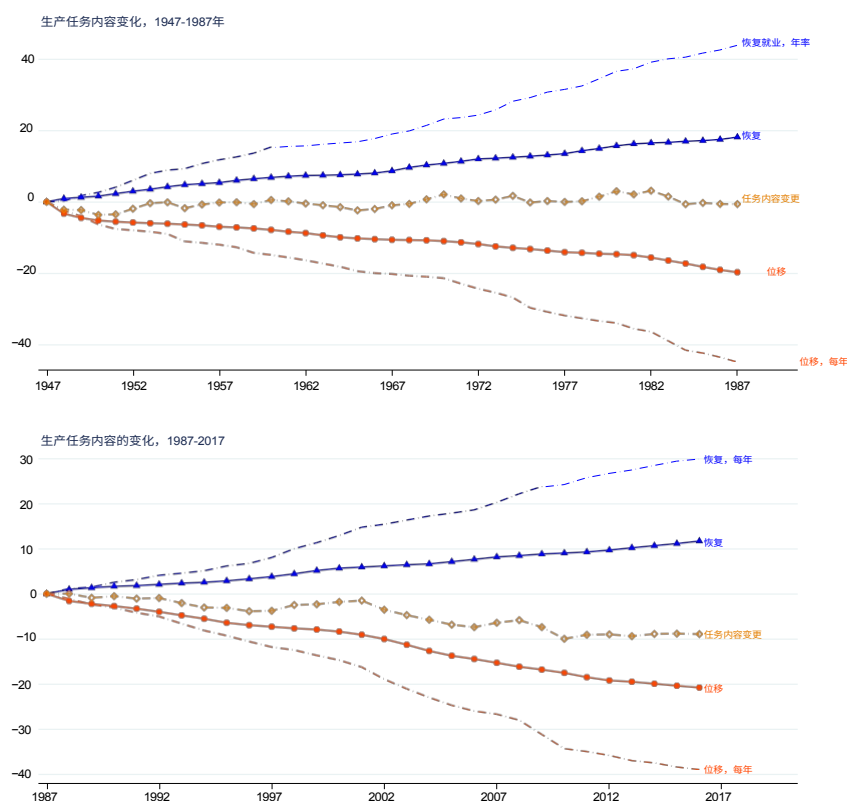
图A6：工资总额分解的替代排序。

注：两幅图表分别展示了采用方程(A18)中交替排序法对工资总额变化进行的分解。上图呈现1947至1987年间劳动力需求（工资总额）的分解结果，下图则展示1987至2017年间劳动力需求（工资总额）的分解结果。假设替代弹性 $\sigma=0.8$ ，并采用相对劳动增效技术变革率（1947-1987年为年均2%，1987-2017年为年均1.5%）进行计算。



图A7：1987-2017年劳动力需求变化来源。

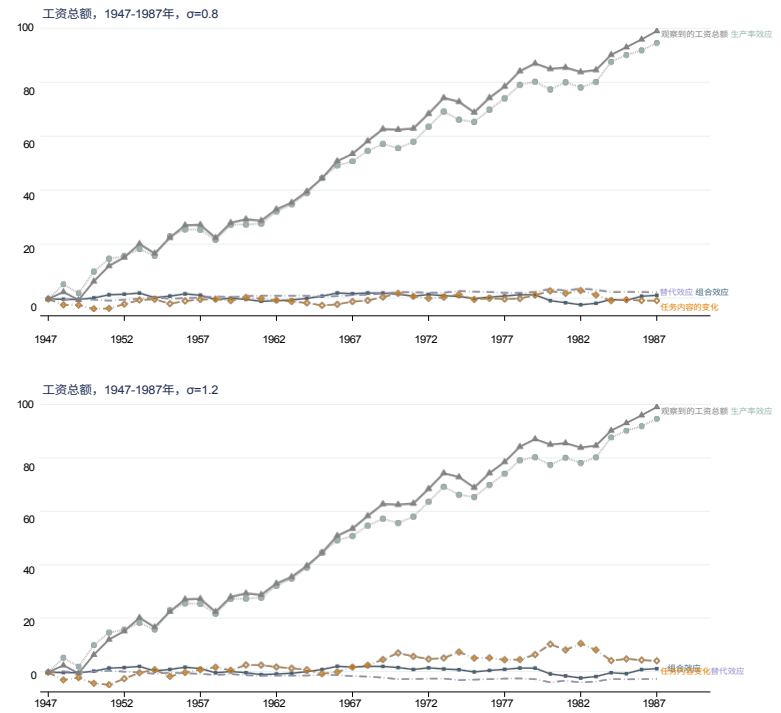
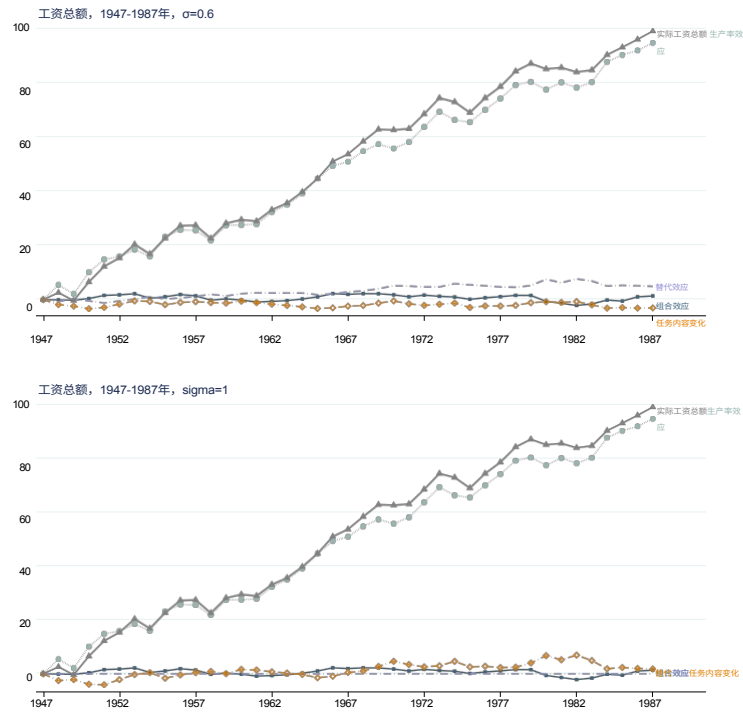
注：上图基于美国劳工统计局数据，分解了1987至2017年间劳动力需求（工资总额）的构成。中下图分别展示了对整体经济和制造业领域中替代效应与恢复效应的估算结果。该分析基于替代弹性 $\sigma=0.8$ 及年均1.5%的相对劳动增效技术变革率。



图A8：位移与复位效应估计值，年度及五年变化。

注：本图展示了基于方程(A14)得出的基准估算值，以及采用年度变化（而非五年窗口期）进行的补充估算。上图涵盖1947-1987年，假设相对劳动增效技术变革的增长率为2%。下图展示1987-2017年数据，假设相对劳动增效技术变革增长率为1.5%。

（替代弹性 $\sigma=0.8$ ）。

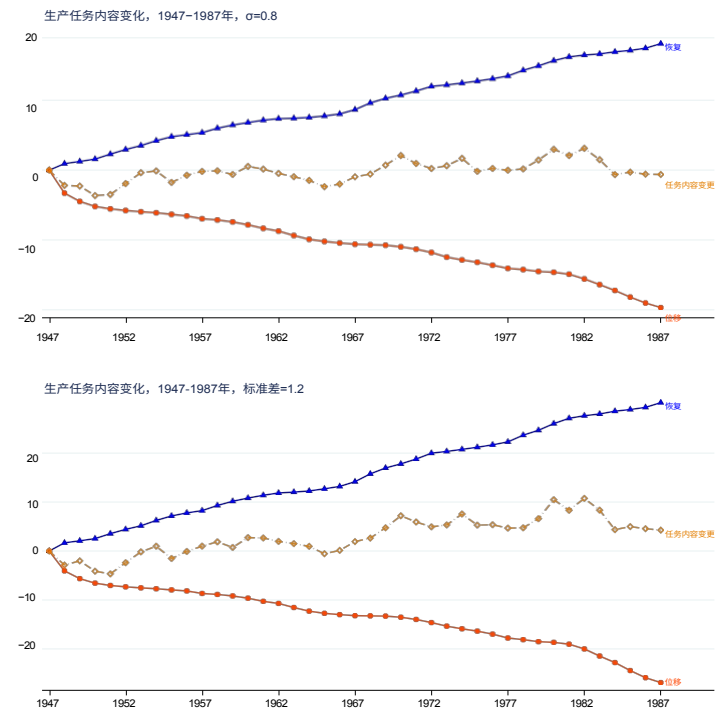
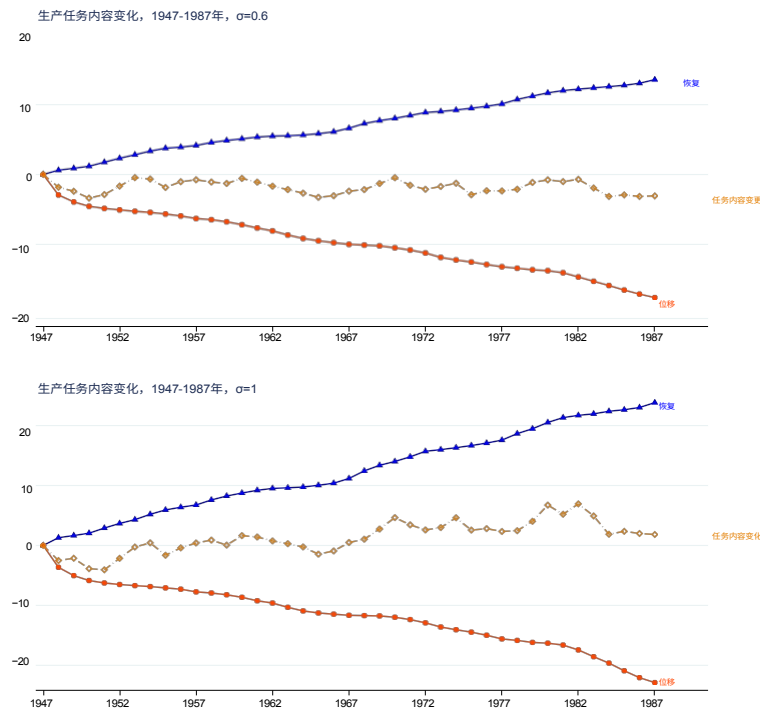


图A9：1947-1987年间，不同 $\sigma$ 值下整个经济体劳动力需求变化的来源

$\sigma$ 值。

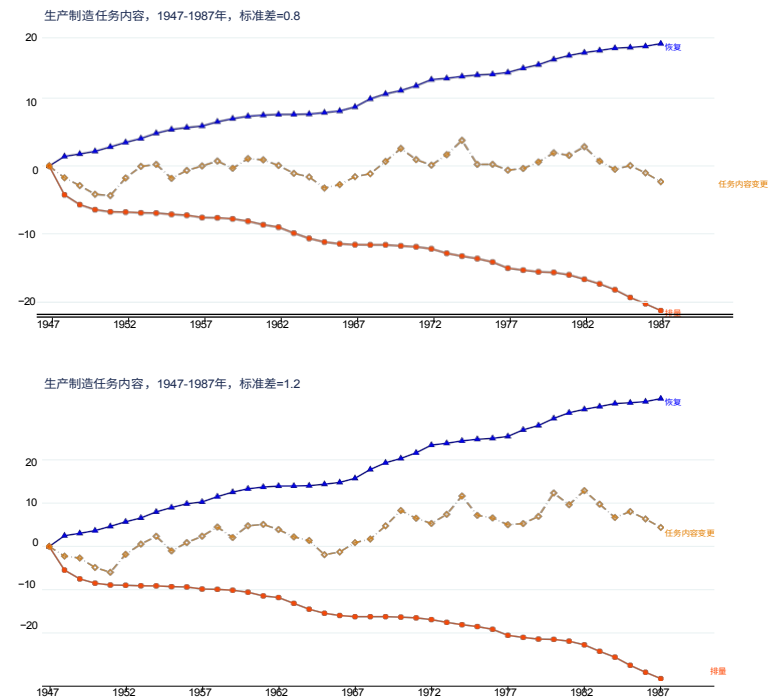
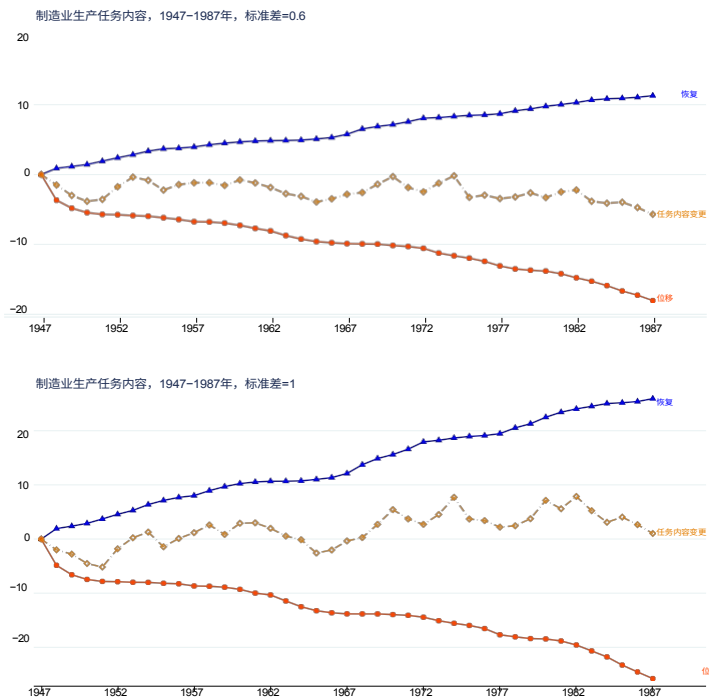
注：本图基于正文中的方程(A9)，呈现1987至2017年间劳动力需求（工资总额）的分解情况。各面板展示其标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革以每年2%的速度推进。





图A10：1947-1987年间不同 $\sigma$ 值下整体经济中替代效应与恢复效应的估计值。

注：本图展示基于正文方程(A14)得出的基准置换效应与恢复效应估计值。各面板呈现其标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革以每年2%的速度推进。



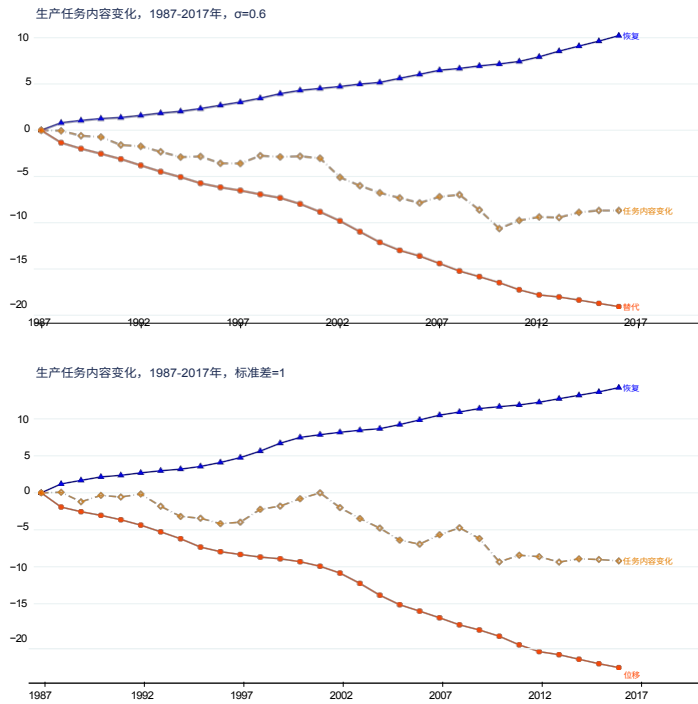
图A11：1947-1987年制造业中不同 $\sigma$ 值的位移效应与恢复效应估计值。

注：本图展示了基于正文方程(A14)得出的劳动力替代与恢复效应基准估计值。各面板呈现其标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革以每年2%的速度推进。



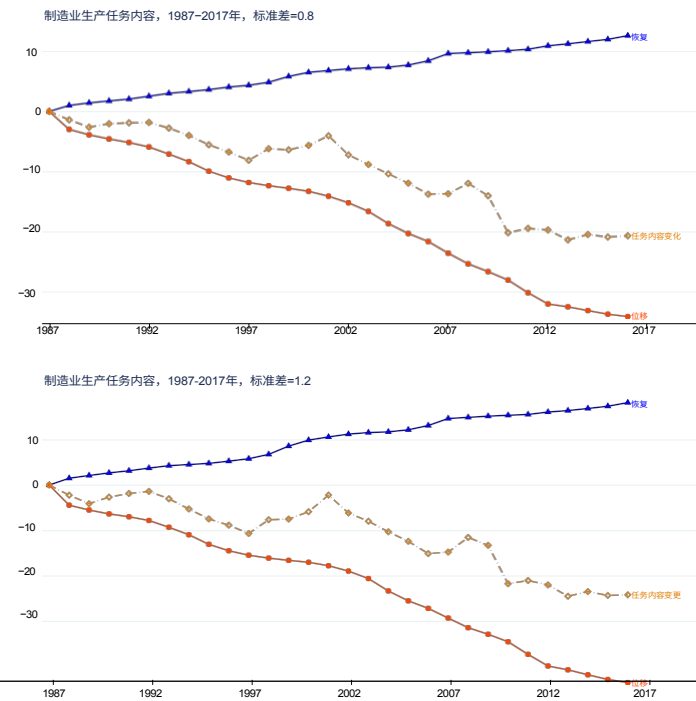
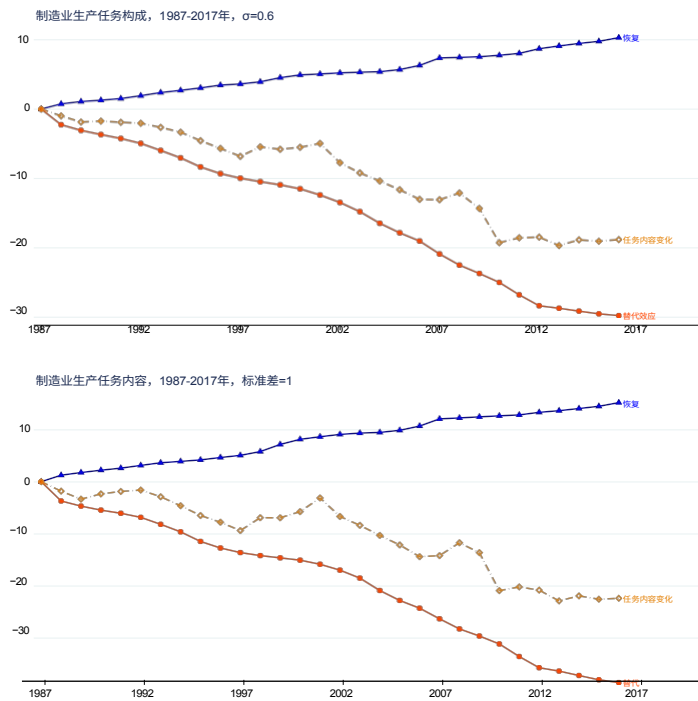
图A12：1987-2017年全经济体劳动力需求变化来源（不同 $\sigma$ 值情况）

注：本图基于正文中的方程(A9)，呈现了1987至2017年间劳动力需求（工资总额）的分解情况。各面板展示了标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革以每年1.5%的速度推进。



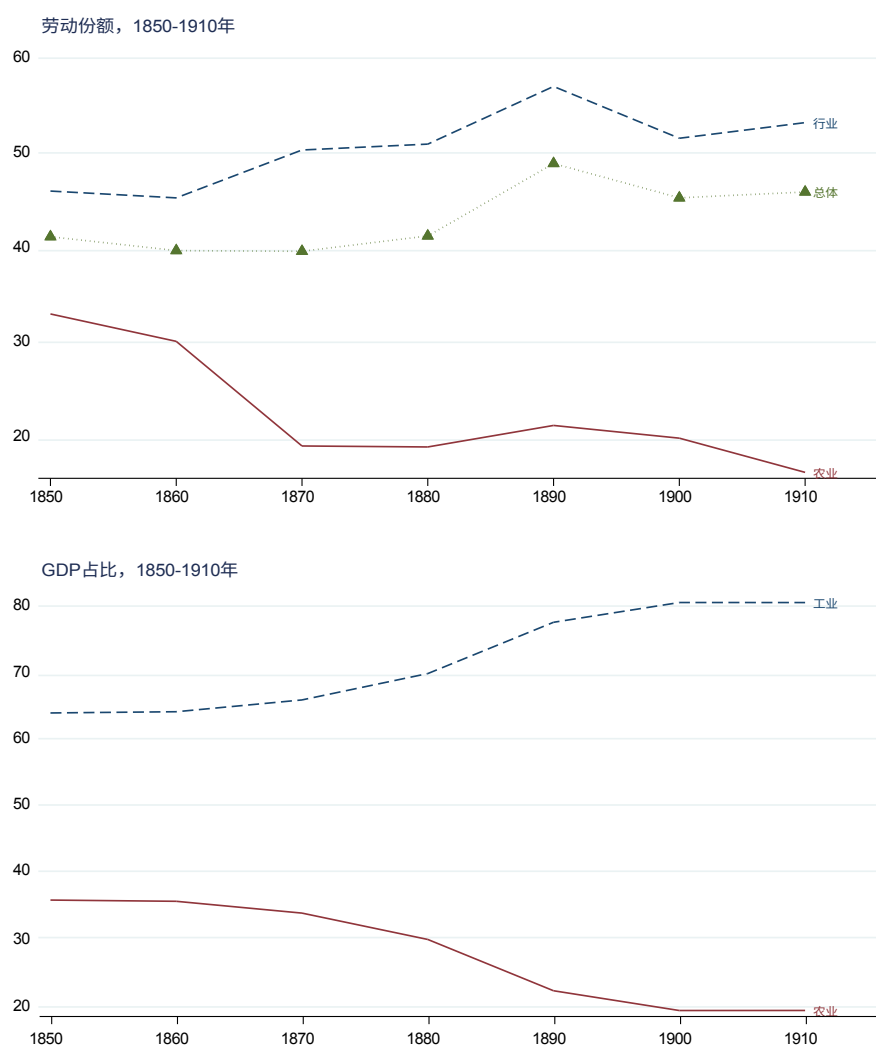
图A13：1987-2017年全经济体不同 $\sigma$ 值下的替代效应与恢复效应估计值。

注：本图展示基于正文方程(A14)得出的基准替代效应与恢复效应估计值。各面板呈现其标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革年均增速为1.5%。



图A14：1987-2017年制造业中不同 $\sigma$ 值的替代效应与恢复效应估计值。

注：本图展示基于正文方程(A14)得出的基准替代效应与恢复效应估计值。各面板呈现其标题所示 $\sigma$ 值对应的结果。所有面板均假设相对劳动增效技术变革年均增速为1.5%。



图A15：1850-1910年农业机械化进程中的劳动份额与部门演变。

注：上图展示1850-1910年间工业（服务业与制造业）及农业在增加值中所占劳动力份额，下图则呈现这些部门增加值占GDP比重。数据源自Budd（1960）。

表A1：生产任务内容总变化量、产量、全要素生产率与行业技能密集度之间的关系。

	产量对数变化量，1987-2016年		全要素生产率对数变化量，1987-2016		技能强度变化，1990-2016	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
任务内容的总变化	0.799 (0.262)	0.581 (0.235)	0.321 (0.152)	0.233 (0.141)	0.096 (0.037)	0.096 (0.037)
中国进口竞争		-3.463 (1.541)		-0.357 (0.407)		0.324 (0.149)
中间产品离岸外包		40.957 (2.726)		17.930 (1.219)		0.593 (0.219)
制造业	-0.286 (0.427)	-0.884 (0.162)	0.161 (0.206)	-0.187 (0.086)	-0.000 (0.019)	-0.037 (0.018)
计算机行业						
观测值	61	61	61	61	61	61
R平方	0.08	0.61	0.12	0.60	0.16	0.23

注：本表报告了生产任务内容总变化与产业产量变化、全要素生产率（TFP）及技能密集度变化之间的估计值。任务内容总变化定义为公式（A14）中计算的替代效应与恢复效应绝对值之和。第1-2列展示了产量变化的结果（源自BEA-KLEMS模型）。第3-4列呈现全要素生产率变化结果（源自BEA-KLEMS数据）。第5-6列呈现技能要求变化结果，以各行业大学学历劳动者占比衡量（数据源自1990年美国人口普查及2012-2016年美国社区调查合并数据）。所有回归分析均基于1987-2017年期间研究采用的61个行业。括号内为抗异方差稳健标准误。