

doi:10.3969/j.issn.1000-7695.2019.14.017

# “工业4.0”对经济发展的影响及作用效果

——基于德国行业面板数据的实证分析

李春梅

(首都经济贸易大学经济学院, 北京 100070)

**摘要:**以德国为研究对象,首次从实证角度探讨“工业4.0”的技术变革对经济发展的影响。“工业4.0”战略之后,德国经济平稳快速增长;采用德国11个主要行业的面板数据,得到“工业4.0”确实对德国经济有一定影响,信息物理系统中短期内物理层的投资会增加经济支出,但网络层和信息层在经济增长中会起到明显的促进作用;2014-2016年,“工业4.0”的时间效应显示德国产业发展出现明显的正向拐点效应。

**关键词:**“工业4.0”;德国经济;信息物理系统

**中图分类号:**F112.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-7695(2019)14-0128-09

## Analysis of the Impact of “Industrial 4.0” on Economic Development Based on the Empirical Analysis of Industry Panel Data of Germany

Li Chunmei

(School of Economics Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

**Abstract:** Taking Germany as the research object, this paper discusses the impact of technological transformation of “Industrial 4.0” on the economic development. Since the strategy of “Industrial 4.0” was put forward, German economy have grown steadily and rapidly. After the use of the panel data of the 11 major German industries, “Industrial 4.0” had a certain effect on the development of the German economy. In the short term of information physical system, the investment in the internal physical layer will increase the economic expenditure, but the network layer and the information layer will play a significant role in the economic growth. the time effect of “Industrial 4.0” shows the obvious positive inflection point effect in the development of the German industry in 2014-2016.

**Key words:** “Industrial 4.0” strategy; German economy; information physics system

### 1 研究背景及文献述评

2011年在德国举办的汉诺威工业博览会开幕式中,德国人工智能研究中心负责人和执行总裁沃尔夫冈·瓦尔斯特尔教授首次提出“工业4.0”这个概念。之后德国以提高工业竞争力为主要目的,成立了“工业4.0”工作组,并于2013年4月的汉诺威工业博览会上发布最终报告《保障德国制造业的未来:关于实施工业4.0战略的建议》,简称“工业4.0”战略<sup>[1]</sup>。德国想通过此举继续保持德国在世界范围内制造业具有的传统优势,并进一步促进本国内新一轮革命性的工业企业在高科技方面的研究

与开发,并开辟创新领域的源泉与现实应用。

“工业4.0”战略提出之后便引起了大量学者的关注。由于“工业4.0”概念相对较新,其实施效果和在企业 and 产业层面的实践还有待于进一步的观察和摸索,目前其还处于理念和战略思考阶段,还不是现实<sup>[2]</sup>。尽管如此,围绕“工业4.0”产生了一系列的解释和界定,如“信息物理系统(Cyber Physical System, CPS)”、“工业互联网”“智能工厂”及“智能制造”等。“工业4.0”是一个在营销技术角度上来说十分高效的概念,其传播速度快到令人诧异,同时这个概念含义不清,有多种解释也并非坏事<sup>[3]</sup>。尽管如此,学者和社会实践所共同认

收稿日期:2018-09-13,修回日期:2018-10-24

基金项目:国家社会科学基金青年项目“基于代际效应和提振效应的工业4.0对中国制造业发展质量的影响机理研究”(16CJL037)

同的最核心的是“工业 4.0”的“智能化”特点，并且“智能化”能够实现并付诸实践的最重要的支撑就是 CPS，它是紧密结合互联网与用户，并由计算机算法检测和控制的一种机制。根据 CPS 的实践运行和学者们的定义，CPS 能够实现计算（Computation）、通信（Communication）与控制（Control）的集成和融合（如图 1），在此过程中，需要物理层面、网络层面及信息层面的支持。

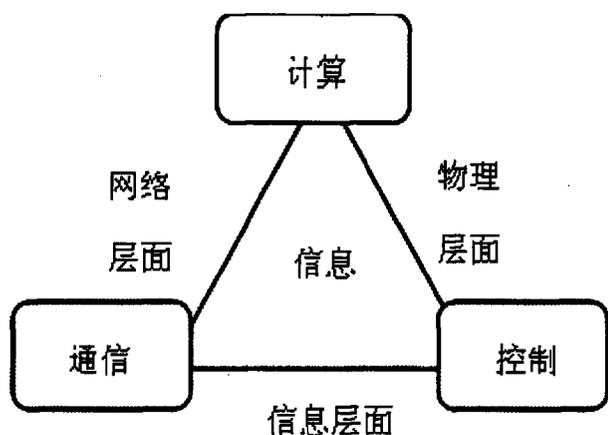


图 1 CPS 的 3C 及 3 个支持层次

“工业 4.0”的提出之所以会受到社会的强烈反响，主要因为技术进步是经济发展的重要动力的主要源泉，这早已被经济学家们所论述。早期的理论阐述包括：古典经济学理论中对机器的使用及劳动分工带来的效率的提高、技术进步在经济发展中的重要作用、熊彼特对“创新”的开创性界定，以及内生经济增长理论等，都认为技术进步是保证经济持续增长的决定因素等。然而定量的分析二者的关系仅从 20 世纪 40 年代开始。

作为重要的历史性技术变革，“工业 4.0”对经济发展的影响首先是生产率方面，通过合作推进决策制定、仿真及绩效，将会更加显著的提升生产率<sup>[4]</sup>，这需要单一真实信息源、信息技术全球化、合作及自动化的推动<sup>[5]</sup>。其次对生产方式的影响，“工业 4.0”是工业生产方式的新一轮革新，是继第一个自动纺织机、第一条流水线和第一个可编程逻辑控制器诞生之后，互联网、大数据、云计算、物联网等新技术给工业生产带来的革命性变化<sup>[6]</sup>。在新一轮产业革命和信息技术得到迅速发展及广泛应用的新条件下，德国积极将先进适用的信息技术应用于机械和装备制造业，在嵌入式系统和自动化工程领域获得了显著成效<sup>[7]</sup>。“工业 4.0”战略作为一种全新的工业生产方式，通过技术实现了实体物理世界和虚拟网络世界的相互融合，反映了人机关系的深刻变革，反映了网络化和社会化组织模式的

应用<sup>[8]</sup>。但是工业革命也会加剧不平等，特别是有可能颠覆劳动力市场，工业革命是经济起飞和加速发展的重要动力<sup>[9]</sup>。

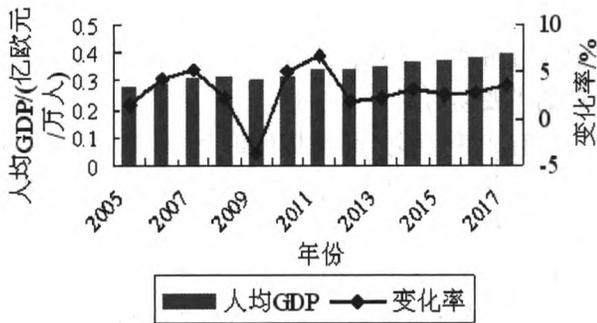
已有文献大部分都是从理论上探讨“工业 4.0”会对经济发展的影响作用，实证分析其对经济发展的影响还少有见到。由于此战略率先由德国提出，虽然到现在已有 5 年左右，但世界范围内其他国家才处于消化引进及积极效仿阶段。因此本文尝试以德国经济数据为研究对象，通过定量分析探讨此次技术变革对德国经济的发展，尤其是对工业发展的影响和带动作用，以再次检验技术进步和经济发展的经典理论。

## 2 “工业 4.0”战略推行前后德国经济的演变

### 2.1 德国经济发展的变化趋势和特点

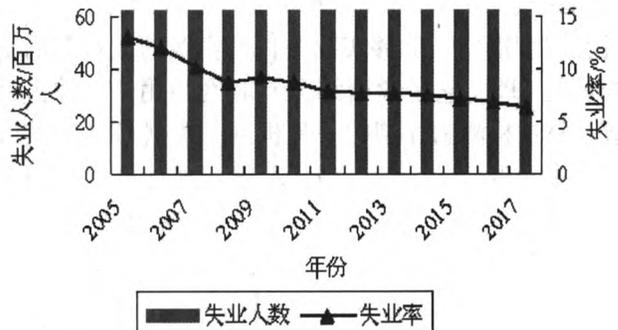
德国作为制造业大国和制造业强国，其经济发展一直在世界领先地位。图 2—图 4 分别为 2005—2017 年德国人均国内生产总值及其变化、工业增加值及其在整个社会产出中所占百分比、失业人员及其变化率、外贸的整体发展情况。曲线出现较大拐点的年份均均为 2009 年。2007 年由美国的次贷危机引起的金融危机席卷了全球，也严重影响了德国的经济发展，使得 2009 年德国人均国内生产总值极度下滑，增长率出现了 25 年间的最低点（-3.73%）。2011 年希腊爆发的主权债务危机，迅速影响到整个欧盟乃至世界经济的发展，德国人均国内生产总值的增长率从 2011 年的 6.63% 迅速下滑到 2012 年的 1.79%，之后国内生产总值和人均国内生产总值增长率缓步上升，从 2013 年开始才逐步抬头，但仍低于之前水平。德国工业产值总量 2009 年较 2008 年有所下降，占比成为 10 年间的最低值 27.81%，之后基本恢复到金融危机前的百分比。2013 年之后，工业产值及其整个社会产出中占平稳上升，平均占比为 30.05%。

相比于其他经济指标，德国失业人数的低谷，并没有显著的出现在 2007 年金融危机和 2011 年希腊主权债务危机期间及两次危机之后的时间段内。德国借助于自身强大的工业产业支撑，在两次危机期间劳动力就业情况没有受到明显冲击，免除了失业带来的经济效应和社会效应。德国总体的外贸进出口呈现上涨趋势，进出口额 2015 年分别达到 119.64 亿欧元和 94.85 亿欧元，进出口额波动较大的年份均出现在 2009 年，负增长率分别为 18.4% 和 17.5%，增长率水平均成为 25 年来的最低点，但之后的 2010 年，德国对外贸易迅速抬头，2009 年的增长率最低点也使得 2010 年的增长率水平均成为 25 年间的最高点，分别为 18.5% 和 19.9%。



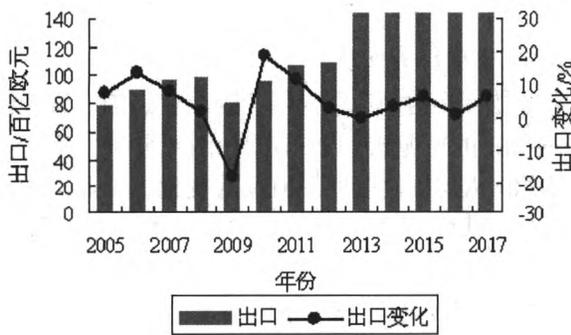
注：数据来源于德国联邦统计

图2 2005—2017年德国人均国内生产总值及变化率



注：数据来源于德国联邦统计局

图3 2005—2017年德国失业人数及失业率的变化趋势



注：数据来源于德国联邦统计局

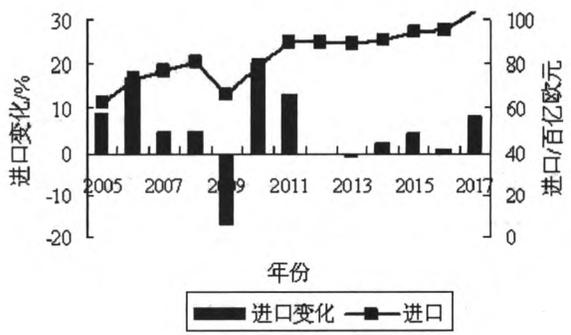


图4 2005—2017年德国外贸的整体发展

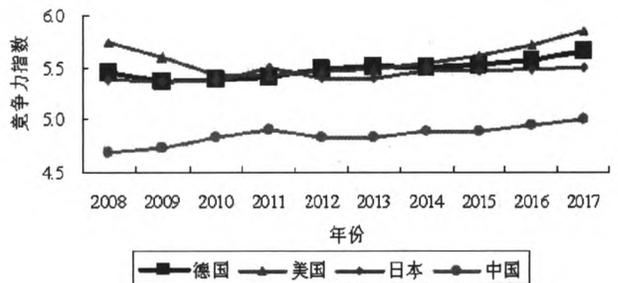
从图2—图4的变化趋势和分析中，得到德国在2013年之后，经济指标均为平稳增速发展趋势，德国的工业在国民经济发展中占有重要地位，这不仅对国民经济发展起到重要的支柱作用，而且能够帮助德国成功的规避经济危机带来的经济周期波动产生的影响。

### 2.2 德国在世界的竞争力变化

由世界经济论坛发布的全球竞争力报告显示，德国2017年全球竞争力指数综合排名为第5名(5.65分，分值0~7)，其创新和商业生态系统的卓越表现尤其值得注意，德国的创新能力和商业成熟度被评为世界前5强，这主要得益于德国高技术准备度(第8)和高质量基础设施(第10)<sup>[10]</sup>。2015年全球竞争力指数综合排名为第4名(5.53分)，得益于劳动力和金融市场效率的提升(分别为28和18位)、宏观环境的加强(第20位)<sup>[11]</sup>。2008—2017年间，德国的全球竞争力指数与日本基本持平，从2015年开始，逐渐于日本拉开差距，紧追美国，在世界的排名相对稳定。

促进21世纪经济发展和提升国家竞争力的关键因素中，除了创新本身之外，还需要人才的推动，尤其是高知识含量的人力资本的积累。世界经济论

坛发布的人力资本报告显示德国2017年全球人力资本指数等级排名为6位(得分74.3)，低于第一名挪威(77.12)，但远高于中国(排名第34位，得分67.72)<sup>[12]</sup>。



注：数据根据2008—2016年《全球竞争力报告》数据整理

图5 2008—2017年世界主要国家全球竞争力指数变化

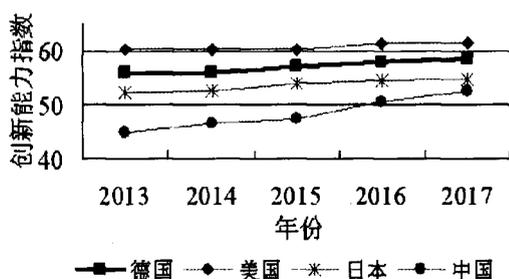
德勤全球制造业组与美国竞争力委员会发布的2010—2013年《全球制造业竞争力指数》显示德国从2010年的第八名上升为2013年第2名，及2016略有下滑，成为第三名。根据世界知识产权组织发布的《2017年全球创新指数》的全球创新指数排名，2017年德国得分58.4(0~100分)，排名第9，低于美国(得分61.4，排名4)高于日本(得分

54.7, 排名 14)。2013—2017 年, 各国家创新能力不断提升, 德国创新指数与美国、日本基本保持平行上升趋势, 中国的创新指数增长相对较快。

表 1 全球制造业竞争力排名及指数

国家	2010 年	2013 年	2016 年
德国	8 (4.8)	2 (7.98)	3 (93.9)
中国	1 (10)	1 (10)	1 (100)
美国	4 (5.84)	3 (7.84)	2 (99.5)
日本	6 (5.11)	10 (6.6)	4 (80.4)

注: 括号中为当年的制造业竞争力指数值



注: 根据世界知识产权组织及《全球信息技术报告 2016》数据整理

《全球信息技术报告 2016》指出, 数字革命改变了创新的本质, 企业将面临越来越大的压力而不断创新, 企业和政府都面临着应对社会数字化产品和服务的需求的挑战, 一个新的经济 (数字经济) 正在形成, 需要在治理和监管方面亟待创新<sup>[13]</sup>。世界经济论坛使用网络完善指数反映世界范围内技术和创新的日益增长的重要性。图 6 世界主要国家网络完善指数中看出, 美国网络完善指数最高, 德国和日本的指数最接近。

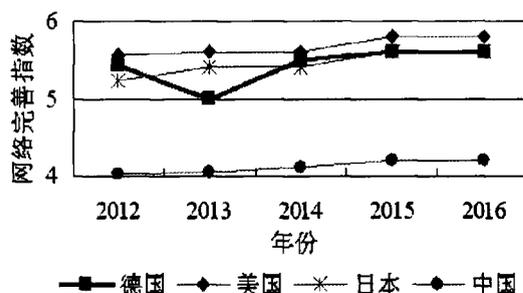


图 6 世界主要国家创新能力指数及网络完善指数

从图 2—图 6 展示出德国在两次危机中, 凭借强大的工业支撑, 尤其是发达且根基稳固的制造业, 保持了国内劳动力的就业水平和失业率水平, 顺利度过两次危机并成为欧洲经济发展的领军, 由此德国开创性的提出了“工业 4.0”战略。德国总体经济的发展和在世界范围内的竞争力, 在 2013 年之后出现相对稳定的态势, 似乎走进了“正轨”, 这是否说明“工业 4.0”战略已经成为了德国经济发展的重要拐点? 如果德国经济的发展和在世界范围内竞争力的平稳快速发展是由此项战略带动的, 那么其对德国经济发展起到了多大程度上的促进作用呢?

### 3 “工业 4.0”对德国经济发展影响的理论框架及模型构建

#### 3.1 “工业 4.0”对经济发展的影响机制

围绕“工业 4.0”的概念和实施, 产生了包括“信息物理系统”“工业互联网”“智能工厂”及“智能制造”等生产制造模式和企业生产方式, 但其最核心的内容简单来概括就是“智能化”, 是在“信息物理系统”支撑基础上, 由于高度机械化、高度自动化、高度信息化和高度网络化而产生的, 包括“消费智能化”和“生产智能化”。

“消费智能化”指对于消费者而言, 消费内

容和消费方式将发生转变。消费者将通过个体的移动终端设备, 通过无线通讯产生的网络化提供的实时服务, 在企业的虚拟网络空间中, 选择自己的个性化需求产品。之前消费者始终是被动的挑选生产者生产出来的产品, 即使这些产品可以通过信息技术方便快捷的到达消费者手中, 但仍然是无差异化的流水线产品。而在“工业 4.0”时代, 消费者的个性化需求能够完全满足, 智能化产品完全是按照不同的消费需求, 也就是个性化使用价值得以实现。

“智能化”可以看成是机械化、自动化、信息化的高度融合和集成, “生产智能化”是其中的重头戏, 这需要将制造过程中的, 生产的设计、生产制造、物流及销售等环节均实现信息的智能化共享, 这里更强调“生产智能化”过程中的虚拟设计和对数据的采集与分析。由此产生了“智能工厂”和“智能生产”的概念。“智能工厂”将“信息物理系统”中网络传输过来的即时消费者个性化需求信息, 通过云计算及企业的大数据储备, 生成标准化的生产数据模块, 并将数据信息通过嵌入式软件调动生产设备从事生产。在“物联网”的帮助下, 调动智能物流、智能移动、智能建筑和智能电网等产生智能产品。智能意味着机器与机器之间的通信, 通过嵌入式软件

和无线通信服务，自动实现处理命令。这些嵌入式软件和处理命令是通过大数据得到的标准化的结果，标准化大大简化和优化了产品的生产过程。整个过程即实现了“智能生产”，因此“智能生产”是高度灵活化的规模化生产，是虚拟世界得以转化成现实世界的重要桥梁。

消费智能化和生产智能化会极大地推进并改变制造业的发展，改变其生产方式、生产关系和生产空间。企业生产方式越来越网络化和信息化，生产流程逐渐向智能化演进；企业受人力资本等生产要素的约束，生产要素异质性效应突显，规模报酬实现递增趋势；行业内的竞争性创新越来越激烈。“智能化”的结果，实现了生产标准化与消费个性化的完美匹配、虚拟世界与现实世界的完美结合、流水线工作与柔性化生产的完美互补。由此使得社会整体提高了生产力，节约了能源、高效的生产，提高了企业生产的灵活性，满足了消费者的多样化需求。这是经济社会发展的飞跃式转变，将对制造行业、企业质量及产品质量带来重大的变革效应，同时对经济增长和效率的提升、创新的推进、对外贸易的发展、对社会的贡献及与环境的影响等多个方面带来巨大冲击。

### 3.2 模型的构建

倍受人们推崇的经济增长模型主要有哈罗德-多马经济增长理论、新古典经济增长理论和新剑桥经济增长理论等。不论那种模型都认为劳动力、资本及技术是构成经济增长的核心三要素。本文延续经典的理论内容，以经济增长作为经济发展的狭义衡量指标，分析劳动力、资本及“工业 4.0”三个主要要素对德国经济的影响。

由于“工业 4.0”最重要的支撑是 CPS（如图 1），CPS 是“工业 4.0”的一个重要指标。故分析 CPS 的使用对德国各个产业发展的影响，成为“工业 4.0”战略对德国经济发展影响的关键所在。将各影响因素变量取对数，一方面可以消除各个变量的波动变化程度的影响，另一方面将各变量之间可能存在的非线性关系转化为线性关系，同时模型可以表示各个解释变化 1% 而引起的产出变化的数量。进一步考查战略是否成为德国经济发展的门限，需要通过引入时间效应进行分析。由此回归模型构建如下：

$$Industry_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(L_{it}) + \beta_2 \ln(K_{it}) + \beta_3 \ln(CPS_{it}) + \beta_4 T + \varepsilon, i, t = 1, \dots, n \quad (1)$$

其中， $Industry_{it}$  表示德国在  $t$  年  $i$  产业部门的经济增长， $L_{it}$  为在  $t$  年  $i$  产业部门的劳动力就业量， $K_{it}$

为在  $t$  年  $i$  产业部门的资本使用量， $CPS_{it}$  表示德国在  $t$  年  $i$  产业部门使用 CPS 情况， $T$  表示时间效应的变量。 $\beta_0$  是常数项，用来表示样本观测值内的不变特征， $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$  分别为待估计参数， $\varepsilon$  是随机误差扰动项。

### 3.3 指标的选取与数据的说明

为了获得统一统计口径，劳动力及固定资本数据采用德国具有代表性的 11 个 2 位数行业（由于数据的可获得性，使用的德国的行业部门包括：制造业、供水/污水处理/废物管理/整治、建设、批发/零售贸易/汽车维修、运输/仓储/邮政/快递活动、住宿和餐饮服务活动、信息和通信、金融保险活动、房地产活动、专业与科学和技术活动、行政和支持服务活动等 11 个行业部门。德国 CPS 相关指标可以获得的数据只能追溯到 2009 年，时间跨度为 2009—2016 年的 8 年序列。因此本文使用的数据为短面板数据。CPS 变量采用图 1 中三个层次来衡量，每个维度又分别包括不同的指标（见表 2）。产业增加值和总固定资本形成数据使用 2010 年为基期进行价格指数平减之后的数据，以减少价格变化引起的数据的波动。

表 2 “工业 4.0”对德国经济影响的指标说明

变量	衡量指标	使用的指标	单位	数据来源
经济增长	增加值 (Industry)	产业增加值	亿欧元	
投入	劳动力(L)	产业内劳动力就业总量	十万人	
	资本(K)	产业总固定资本形成	亿欧元	
物理层	(P1)	使用固定宽带连接互联网的企业		德国联邦 统计局 网站
	(P2)	使用移动宽带连接互联网的企业		
	(P3)	计算机的使用		
信息物理系统	网络层(N1)	接入互联网的企业	百分比	
	(N2)	有网站的企业		
信息层	(I1)	通过网站,APP 或 EDI 购买		
	(I2)	使用因特网访问的人		

### 3.4 模型的完善及回归结果分析

根据表 2 指标的选取与数据的说明，CPS 量化为物理层、网络层及信息层三个维度，并且每个维度采用多个指标，回归方程（1）进一步细化为回归方程（2）：

$$Industry_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(L_{it}) + \beta_2 \ln(K_{it}) + \beta_3 \ln(P1_{it}) + \beta_4 \ln(P2_{it}) + \beta_5 \ln(P3_{it}) + \beta_6 \ln(N1_{it}) + \beta_7 \ln(N2_{it}) + \beta_8 \ln(I1_{it}) + \beta_9 \ln(I2_{it}) + \beta_{10} T + \varepsilon, i = 1, \dots, 11; t = 1, \dots, 8 \quad (2)$$

根据德国联邦统计局网站的数据说明，P1、P2、

P3 分别代表“使用固定宽带连接互联网的企业”、“使用移动宽带连接互联网的企业”、“计算机的使用”三个物理层变量；N1 和 N1 代表“接入互联网的企业”和“有网站的企业”两个网络层变量；I1 和 I2 代表“通过网站，APP 或 EDI 购买”和“使用因特网访问的人”两个信息层变量。

应用计量软件 Stata12.0，对回归方程（2）进行系数估计。文中使用的面板数据属于方块数据，即  $N$  ( $N=11$ ) 和  $T$  ( $T=8$ ) 接近的面板，经过检验为平衡面板。由于考察时间变量对德国产业发展的影响，引入各年份的虚拟变量。又考虑到由于每个产业的生产情况不同，可能回归方程中存在不随时间而变化的个体遗漏变量，因此需要使用固定效应模型（FE）还是随机效应模型（RE）进行估计。进行豪斯曼检验，由于得到的  $P$  值为 0.000 0，故强烈认为应该使用固定效应模型，而不是随机效应模型。作为对比分析，仍然将使用随机效应模型得到的估计结果列明如表 3 所示，同时使用混合回归中聚类稳健标准误方法（OLS（VCE））。表 3 中 FE 列估计值中，得到的  $F$  检验的  $P$  值为 0.000 0，意味着固定效应模型明显优于混合回归。

表 3 中 FE 中各估计值，大部分主要解释变量并不显著，即使是 OLS（VCE）中的估计结果，也并不显著于 RE 列的估计结果。使用检验组间异方差的沃尔德方法，对该回归的固定效应模型进行检验后发现<sup>[14]</sup>，回归过程存在强烈的组间异方差问题（检验结果  $\text{Prob} > F = 0.000 0$ ）。继续使用广义最小二乘法（GLS）解决此问题，得到的结果见表 3 中 GLS 列中的各个估计数值。

稳健标准误的混合回归过程中，没有考虑存在的组间异方差与组间同期相关问题，因此使用面板校正标准误方法（PCSE）进行估计，估计结果如表 3 中 PCSE 列的所示各值。可以看到，PCSE 列的各估计系数与 RE、OLS（VCE）和 GLS 各列的估计系数完全一样，只是标准误不同，另外部分影响变量的显著性增强。使用沃尔德检验方法检验回归数据的组内自相关问题<sup>[15]</sup>。结果显示强烈拒绝“不存在一阶组内自相关的原假设”（ $\text{Prob} > F = 0.000 0$ ），

因此该数据存在组内自相关问题。使用截面相关检验方法对实证数据进行组间截面相关检验<sup>[16]</sup>，检验结果： $\text{Pesaran's test of cross sectional independence} = -0.481$ ， $\text{Pr} = 1.369 7$ ； $\text{Friedman's test of cross sectional independence} = 2.489$ ， $\text{Pr} = 0.962 2$ ，故该面板数据不存在组间同期相关问题。

通过上面的一系列检验发现，该面板数据存在组间异方差和组内自相关，但不存在组间截面相关。使用面板校正标准误（PCSE）并且解决组内自相关的 FGLS 方法进行回归，包括要求各组的自回归系数相同（AR1）及允许各组自回归系数不同的组内自相关情形（PSAR1），结果见表 3 中 AR1 和 PSAR1 两列的估计值。

观察表 3 中的各列估计结果，在固定效应模型方法的回归结果中，除信息层变量 I2 外，其余各主要影响因素的系数均不显著（没有通过 0.01 的显著性水平）。OLS（VCE）、RE、GLS 和 PCSE 回归结果各列的估计系数完全一样，但是各个系数的标准差不同，且变量的显著性不尽相同。相比于 FE 回归结果，RE、GLS 和 PCSE 回归结果得到的劳动力和总固定资本形成都表现出 0.01 水平上的显著性，正向相关系数分别为 56.336 和 103.941。物理层的  $\ln P3$  的系数并不显著相关，而使用  $\ln P1$ 、 $\ln P2$  则表现为 0.05 及以上水平上的显著性，但相关系数为负值。网络层面  $\ln N2$  变量基本显著正相关。信息层面中  $\ln I2$  变量基本显著正相关。时间效应的各个年份变量估计系数中，2014—2016 年均表现出与产业增加值正向相关的关系，且显著性水平通过了 0.05 的检验，此时意味着“工业 4.0”战略提出以后确实对德国经济的发展起到了积极的促进作用。

使用 PCSE 并且解决组内自相关的回归中，与前面几种回归方法比较，各个变量的估计系数值及系数标准差变化较大。在 AR1 回归结果中，变量的显著性水平检验变化较小，影响因素基本保持前面的显著性相关结果。但在 PSAR1 中，总体变化较为明显，其中仅劳动力、 $\ln I2$  和 2015 与 2016 年通过显著性水平检验，其余主要解释变量均不显著性相关。

表 3 “工业 4.0”对德国产业影响的回归估计结果

变量	OLS (VCE)	FE	RE	GLS	PCSE	AR1	PSAR1	
劳动力	$\ln L$	56.336 (38.233)	-141.692 (151.555)	56.336 ** (25.736)	56.336 ** (21.559)	56.336 *** (15.027)	71.132 *** (10.684)	76.407 *** (3.144)
资本	$\ln K$	103.941 * (55.227)	-36.372 (43.832)	103.941 *** (21.251)	103.941 *** (17.802)	103.941 *** (12.261)	83.203 *** (11.031)	6.276 (7.189)

表 3 (续)

变量	OLS (VCE)	FE	RE	GLS	PCSE	ARI	PSARI	
物理层	lnP1	-518.811 (424.129)	40.827 (47.818)	-518.811 ** (292.293)	-518.811 ** (244.856)	-518.811 (415.951)	-247.998 (249.390)	-50.147 (95.315)
	lnP2	-119.827 (60.263) *	-5.909 (11.400)	-119.827 ** (56.125)	-119.827 ** (47.016)	-119.827 ** (53.033)	-53.068 (33.405)	-10.740 (11.538)
	lnP3	295.914 (742.603)	60.087 (166.200)	295.914 (996.386)	295.914 (834.680)	295.914 (807.454)	214.553 (505.984)	142.746 (136.967)
网络层	lnN1	-156.600 (992.584)	23.781 (177.523)	-156.600 (1032.373)	-156.600 (864.827)	-156.600 (861.424)	-221.397 (540.570)	-83.473 (181.313)
	lnN2	206.618 (112.498)	0.805 (25.899)	206.618 ** (83.109)	206.618 ** (69.621)	206.618 *** (64.114)	88.644 ** (45.094)	-8.431 (11.683)
信息层	lnI1	-100.316 (83.609)	26.023 (15.594)	-100.316 (82.798)	-100.316 (69.361)	-100.316 (64.017)	-27.767 (26.998)	5.748 (17.011)
	lnI2	136.615 (229.446)	118.440 ** (56.210)	136.615 (91.463)	136.615 * (76.620)	136.615 * (79.588)	88.281 (53.779)	70.337 ** (29.452)
年份	2010	54.547 (55.425)	6.824 (8.256)	54.547 (54.168)	54.547 (45.377)	54.547 ** (24.116)	22.425 * (13.330)	10.999 (8.793)
	2011	63.262 (50.407)	13.200 (11.941)	63.262 (65.223)	63.262 (54.638)	63.262 * (35.513)	27.983 (23.145)	8.253 (10.962)
	2012	66.668 (52.773)	20.382 (13.441)	66.668 (81.064)	66.668 (67.908)	66.668 (52.655)	32.983 (34.025)	7.320 (17.829)
	2013	109.642 (80.554)	21.980 (15.041)	109.642 (91.017)	109.642 (76.246)	109.642 * (61.903)	54.489 (39.639)	9.930 (17.073)
	2014	189.813 (132.663)	36.192 ** (17.082)	189.813 ** (99.843)	189.813 ** (83.639)	189.813 ** (78.216)	103.567 ** (49.946)	26.434 (19.711)
	2015	195.410 (137.579)	43.379 ** (17.608)	195.410 ** (94.387)	195.410 ** (79.069)	195.410 ** (72.446)	114.183 ** (43.731)	38.710 ** (19.891)
	2016	192.032 (125.892)	77.781 ** (23.140)	192.032 (132.273)	192.032 * (110.806)	192.032 ** (91.248)	142.368 ** (61.868)	64.993 ** (35.721)
常数项	406.533 (1 907.951)	249.944 (1 346.970)	406.533 (1 338.863)	406.533 (1 121.576)	406.533 (1 558.890)	19.960 (1 118.785)	-769.189 (401.616)	
样本数	57	57	57	57	57	57	57	
R <sup>2</sup>	0.730 2	0.401 9	0.730 2	—	0.730 2	0.669 3	0.821 7	

注：1) \*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05、0.1 的水平上显著；2) 括号内的值为 t 值

### 3.5 回归方程的优化及回归结果

在 CPS 的量化指标中，物理层面对产业增长的影响可能不只是当期的作用，还会进一步影响下一年经济的发展，需要考虑上一期物理层面的投入是否会对当期产业发展产生影响。引入物理层面量化指标滞后一期的数据，来逐步回归并观察估计结果。回归方程 (2) 变化为回归方程 (3)：

$$\begin{aligned}
 Industry_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln(L_{it}) + \beta_2 \ln(K_{it}) + \beta_3 \ln(P1_{it}) + \beta_4 \ln(P2_{it}) + \beta_5 \ln(P3_{it}) + \beta_6 \ln(N1_{it}) + \beta_7 \ln(N2_{it}) \\
 & + \beta_8 \ln(I1_{it}) + \beta_9 \ln(I2_{it}) + \beta_{10} L1. \ln(P1_{it}) + \beta_{11} L1. \ln(P2_{it}) + \beta_{12} L1. \ln(P3_{it}) + \beta_{13} T + \varepsilon, i = 1, \dots, 11; t = 1, \dots, 8
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 L1.  $\ln(P1_{it})$  表示对“使用固定宽带连接互联网的企业”取对数后的一阶滞后变量，L1.  $\ln(P2_{it})$  表示对“使用移动宽带连接互联网的企业”取对数后的一阶滞后变量。

继续应用计量软件 Stata12.0 操作回归过程。和回归方程 (2) 的检验结果一样，数据存在强烈的组间异方差和组内自相关问题。但由于引入上一期物理层面投入变量的滞后项，使得回归数据较少，组间同期相关问题无法检验，此时也可以近似认为不存在组间相关。使用自回归系数相同及允许各组自回归系数不同的组内自相关情形的面板校正标准误方法进行逐步回归检验，估计的各个系数数值见表 4。

表 4 “工业 4.0”对德国经济影响的回归估计结果 2

变量		ARI			PSAR1		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
劳动力	lnL	36.262 *	52.780 **	39.161 **	36.119 ***	36.540 ***	36.373 ***
		(21.524)	(16.860)	(20.507)	(5.736)	(8.925)	(8.918)
资本	lnK	116.401 ***	99.305 ***	113.630 ***	41.202 ***	68.596 ***	68.111 ***
		(18.298)	(14.076)	(17.702)	(12.246)	(13.105)	(12.930)
物理层	lnP1	-216.852	-235.845	-263.431	13.155	48.006	50.554
		(288.708)	(236.650)	(265.027)	(64.774)	(110.704)	(94.898)
	lnP2	-128.650 **	-97.208 **	-127.501 **	-19.816	-48.457 **	-48.062 **
		(56.023)	(46.279)	(55.202)	(19.320)	(20.656)	(20.653)
	lnP3	809.764	537.154	731.556	54.570	0.276	5.323
		(656.867)	(531.114)	(622.391)	(175.412)	(220.383)	(192.228)
物理层滞后项	L1. ln (P1)	-327.080	-237.704	-325.015	-35.894		
		(207.749)	(176.011)	(206.282)	(51.379)		
	L1. ln (P2)	-49.185		-42.186	-11.668	-30.975 *	-30.679 *
		(41.471)		(36.212)	(13.197)	(17.264)	(15.970)
	L1. ln (P3)	-127.285			5.823	6.067	
		(226.617)			(57.609)	(98.463)	
网络层	lnN1	-500.102	-452.350	-525.249	30.367	229.431	226.452
		(582.020)	(520.594)	(575.662)	(187.184)	(233.718)	(231.610)
	lnN2	233.402 **	179.789 **	241.432 **	49.565	139.923 ***	138.826 ***
		(89.761)	(75.349)	(90.952)	(32.556)	(37.109)	(36.047)
信息层	lnI1	-76.036	-43.150	-80.186 *	-9.757	-40.564 *	-39.343 *
		(48.885)	(34.642)	(46.828)	(18.495)	(21.452)	(21.301)
	lnI2	130.032 **	91.208	127.985 *	27.729	-11.315	-10.497
		(77.632)	(59.060)	(76.678)	(19.784)	(22.164)	(23.139)
年份	2011	48.583 **	25.948 *	46.554 **	10.360	22.988 **	22.752 **
		(22.828)	(14.865)	(21.649)	(7.411)	(10.588)	(10.344)
	2012	85.752 **	38.600	76.639 **	16.783	42.099 **	41.949 **
		(44.063)	(24.459)	(38.713)	(14.701)	(18.997)	(18.920)
	2013	119.891 **	55.140 **	109.734 **	17.918	47.855 **	47.553 **
		(53.398)	(30.887)	(49.364)	(15.323)	(20.814)	(20.422)
	2014	171.834 **	93.457 **	160.968 **	26.770	49.836 **	49.464 **
		(69.750)	(47.038)	(65.899)	(17.845)	(23.930)	(23.896)
	2015	232.738 **	140.982 **	224.112 **	41.686 *	60.498 **	60.077 ***
		(92.577)	(62.420)	(89.527)	(22.331)	(25.079)	(24.792)
	2016	217.097 **	151.572 **	203.972 **	50.939	55.286	55.609
		(82.827)	(65.933)	(77.887)	(34.070)	(36.252)	(36.149)
常数项		459.832	524.230	504.053	-759.003 **	-1 726.749 ***	-1 723.622 ***
		(1 510.109)	(1 369.706)	(1 501.231)	(315.414)	(410.188)	(387.498)
样本数		48	48	48	48	48	48
R <sup>2</sup>		0.733 7	0.700 5	0.730 2	0.901 4	0.919 5	0.919 1

注：1) \*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05、0.1 的水平上显著；2) 括号内的值为 t 值

观察表 4 的回归估计结果，相比于表 3 中的值，各种方法得到的变量的系数估计值显著性程度增强。引入信息物理系统的量化指标中物理层面的一阶滞后项后，各个估计方法中得到的 R<sup>2</sup> 明显变大，模型

的拟合优度变强，此时模型的线性无偏估计更佳。劳动力和资本变量显著性均较好，且为正向相关。

物理层中 lnP2 在 PSAR1 回归方法的情况 (1) 中没有通过显著性检验，其他情况均通过了 0.05 水

平的显著性检验,另外两个衡量变量没有明显的相关性。物理层变量为负相关回归系数。物理层滞后项中仅 lnP2 在 PSAR1 回归方法的情况(2)和情况(3)中表现为 0.1 的相关性,系数仍为负值。和物理层的情况相似,网络层中的 lnN2 在 PSAR1 回归方法的情况(1)中没有通过显著性检验,其他情况均通过了 0.05 及以上水平的显著性检验。信息层两个自变量中,lnI1 变量在使用 AR1 的情况(3)及 PSAR1 方法的情况(2)和情况(3)中表现为 0.1 的相关性,系数仍为负值;lnI2 变量在使用 AR1 的情况(1)和表现为 0.1 及以上水平的相关性,系数是正值。物理层作为基础设施的投资,虽然前期和下一期的投入会使得当期的总产出减少,但是如果作为固定资产投资,可能更会发挥长效影响作用。另外,时间效应中,除 PSAR1 方法的情况(1)中各个年份的系数不显著外,其余的情况表现较好,估计系数均为正值,基本保持 0.05 水平以上的显著性。

从回归结果中信息物理系统的三个指标的估计系数看,目前 CPS 对产业增加值产生了一定的影响效果,其中物理层面的影响是负相关,这可能是“工业 4.0”战略具今时间较短,物理层面的要素基本作为固定资产投资支出,其积极的促进作用还需要时间的规模经济性来发挥;网络层和信息层的影响的积极的,其中“有网站的企业”和“使用因特网访问的人”两个要素由为重要,有网站的企业和使用因特网访问的人增加 1%,经济增长会变动 138-241 个单位(见表 4 系数),这无疑大大的促进了经济的增长,发挥了非常强大的促进效应。

#### 4 结论

本文基于经典的技术进步对经济发展的影响理论,以德国为研究对象通过统计分析和计量实证两个方面系统分析了“工业 4.0”对德国经济发展的影响。得到“工业 4.0”作为重大的技术变革,通过“消费智能化”和“生产智能化”显著的影响德国经济增长。

统计分析德国 2013 年前后经济的总体增长情况,包括德国人均国内生产总值、工业增加值及其在整个社会产出中所占百分比、失业人员、外贸的发展变化等情况,得到德国在两次经济危机中经济发展确实受到了强烈影响,但是德国坚实的工业基础尤其是制造业的突出地位帮助德国顺利度过难关,“工业 4.0”战略之后,德国经济平稳快速增长。

计量实证检验得到 2013 年德国提出的“工业 4.0”战略确实对德国主要产业的增加值产生了较为

明显的推动作用。支撑“工业 4.0”的核心信息物理系统,在一定程度上起到巨大的推动作用,信息物理系统中的网络层和信息层在这个推动过程中,发挥了不可替代的积极作用。“工业 4.0”战略开始实施后的 2014-2016 年,德国经济发展出现了明显的正向拐点效应。但由于“工业 4.0”战略提出的时间比较短,其对德国经济今后的发展乃至对世界经济的助推作用的长期的影响效果还有待进一步的观察和证实。

#### 参考文献:

- [1]工业 4.0 工作组. 德国联邦教育研究部. 德国工业 4.0 战略计划实施建议(上)[J]. 机械工程导报,2013(7-9):23-55.
- [2]张曙. 中国制造企业如何迈向工业 4.0[J]. 机械设计与制造工程,2014(12):1-5.
- [3]森德勒. 工业 4.0 即将来袭的第四次工业革命[M]. 邓敏,李现民,译. 北京:机械工业出版社,2014.
- [4]SCHUH G,POTENTE T,WESCH-POTENTE C,et al. Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of industrie 4.0[J]. In 2nd CIRP Robust Manufacturing Conference,2014(19):51-56.
- [5]SCHUH G,REUTER C,HAUPTVOGEL A,et al. Hypotheses for a theory of production in the context of industrie 4.0[J]. Advances in Production Technology,2015,11(1):11-23.
- [6]GRUBER F E. Industry 4.0: a best practice project of the automotive industry[J]. Digital Product and Process Development Systems,2013(411):36-40.
- [7]VOUDOURIS I,LIOUKAS S,LATRELLI M. Effectiveness of technology investment: impact of internal technological capability, networking and investment's strategic importance[J]. Technovation,2012,3(411):400-414.
- [8]裴长洪,于燕. 德国“工业 4.0”与中德制造业合作新发展[J]. 财经问题研究,2014(10):27-33.
- [9]中国社会科学院工业经济研究所课题组. 第三次工业革命的特征及影响[J]. 中国社会科学报,2012,9:93-98.
- [10]SCHWAB K. The global competitiveness report 2017-2018[R]. New Delhi:World Economic Forum,2018:23.
- [11]SCHWAB K. The global competitiveness report 2015-2016[R]. New Delhi:World Economic Forum,2015:24.
- [12]SCHWAB K. Human capital report 2017[R]. New Delhi:World Economic Forum,2017:8.
- [13]SILJA B,SOUMITRA D,BRUNO L. The global information technology report 2016[R]. Switzerland:World Economic Forum and INSEAD,2016.
- [14]GREENE W. Econometric analysis (4th edn)[M]. New Jersey:Prentice Hall,2000:598.
- [15]WOOLDRIGE J M. Econometric analysis of cross section and panel data[M]. Cambridge:MIT Press,2002:282-283.
- [16]FRIEDMAN M. The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance[J]. Journal of the American Statistical Association,1937,32(200):675-701.

作者简介:李春梅(1983—),女,吉林九台人,讲师,博士,主要研究方向为产业经济与技术创新。