

引用格式:丁世豪,李平.数字化转型如何促进制造业创新[J].技术经济,2024,43(8):1-11.

DING Shihao, LI Ping. How digital transformation promotes manufacturing innovation[J]. Journal of Technology Economics, 2024, 43(8): 1-11.

数字化转型如何促进制造业创新

丁世豪¹, 李平²

(1. 河南理工大学财经学院, 焦作 454003;

2. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732)

摘要:选取中国制造业2005—2020年面板数据,采用双向固定效应模型考察了数字化转型对创新的影响,并进一步运用中介效应模型基于市场、技术、产品维度对其影响机制进行了检验。研究表明:数字化转型具有显著的创新效应,且表现出行业和投入双重异质性,一方面,数字化转型抑制了劳动资源密集型行业创新,但对资本技术密集型行业创新呈正向影响;另一方面,硬件数字化转型相较软件数字化转型的创新效应更强。市场规模效应、技术改造效应、产品革新效应是数字化转型推动制造业创新的三大渠道,其中,硬件数字化转型可引致技术改造升级和产品革新开发促进创新,而软件数字化转型则通过本土市场规模扩大和产品革新开发带动创新。

关键词:数字化;制造业;创新

中图分类号: F49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2024)08-0001-11

DOI: 10.12404/j.issn.1002-980X.J24021901

一、引言

党的二十大报告提出要深入实施创新驱动发展战略,加快发展数字经济,推动制造业向高端、智能、绿色迈进。创新是助推制造业摆脱“大而不强、全而不优”困境,进而实现其高质量发展的关键。数字化转型作为数字经济与实体经济深度融合的重要表现形式,有利于催生经济新业态和商业新模式,改善供给侧要素配置效率,并引发需求侧深刻复杂变化,重塑市场、技术、产品的资源价值^[1],或将日益成为制造业创新的核心动力来源。在创新驱动与数字经济背景下,探究数字化转型对制造业创新的作用机制,有助于全面评估数字化转型的经济效应,以及把握制造业高质量发展的有效路径,为政府制定相关产业政策提供参鉴。

与本文相关的文献可分为三支,第一是创新的影响因素研究。创新作为培育产业竞争优势的基石,其影响因素一直是研究热点,归纳起来主要集中于三个方面:一是研发投入,二是技术获取,三是市场环境。普遍认为,资金、人力等内部研发投入是创新体系中不可或缺的要害^[2],由于研发资金投入在一定程度上反映了基础研究能力,也就决定了自主创新的水平^[3],因此研发资金投入往往与创新产出呈正相关关系^[4];且相对素质较低的劳动力而言,素质较高的劳动力对资金更具替代性,所以人力资本能够对创新能力产生激励效应^[5],二者表现出相同的变化趋势^[6]。另有学者指出,技术水平提升是创新产出的重要来源,既有技术工艺改良、直接的技术购买、间接的技术溢出不仅降低了研发成本^[7],还加快了创新进度^[8]。此外,有研究关

收稿日期:2024-02-19

基金项目:国家自然科学基金专项项目“面向2040年的中国经济社会发展愿景研究”(L2124005);河南省哲学社会科学规划青年项目“双循环格局下进口推动制造业高质量发展的机制及优化路径研究”(2021CJJ138);河南理工大学2022年度基本科研业务费专项项目“双循环格局下中国制造业进口的演进路径:规模、结构及效率的三维考察”(SKJYB2022-11);教育部产学研合作协同育人项目“新商科视角下财经类专业数字化人才培养基地建设”(230804978302352)

作者简介:丁世豪,博士,河南理工大学财经学院讲师,研究方向:数字经济与产业创新;李平,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所研究员,研究方向:产业创新与技术经济。

注了市场环境对创新的影响,如来自金融系统的信贷支持优化了金融市场的资源配置,缓解了创新过程中的融资约束,分散了研发风险并提供了长效创新激励^[9];以市场为导向的制度质量越高,越能促进技术创新^[10];而环境规制则对创新具有“技术激励”和“研发挤出”的正负双重效应^[11]。

第二支文献是关于数字化转型的经济效应研究。数字化转型即数字化、网络化、智能化技术的扩散与应用^[12],相关研究围绕定性和定量分析展开。随着研究的不断深入,定性分析由最初的内涵界定延伸至价值维度、驱动模式等理论体系的构建^[13-15],定量分析则由以熵权法和投入产出法为主的数字化转型水平测度拓展至其经济效应研究。既有研究表明,数字化转型通常能够产生显著的经济效应,但由于行业、规模、所有制等属性不同,导致经济效应呈现异质性。例如,数字化转型会因企业规模和转型策略选择的差异而产生不同效果^[16],数字化转型对制造业 GDP 的拉动作用存在极化或梯度现象^[17]。该效应同样表现在其他经济领域,如果制造业的资本密集程度较高或融资约束较强,则数字化转型对出口技术复杂度的促进作用越明显^[18];当制造业具有劳动力优势或其规模较小时,数字化转型对全要素生产率的提升效应更强^[19]。同时,数字化投入差异也是致使经济效应异质性的主要原因,就投入内容角度看,硬件设施和软件服务的数字化投入对产业链强度的影响程度与方向有所区别^[20];从投入来源角度看,国外数字化投入无益于制造业分工地位提高,若要实现全球价值链攀升则需依赖国内数字化投入^[21]。

最后一支文献是数字化转型对创新的影响研究。在创新驱动发展和产业数字化的战略背景下,学术界逐渐将数字化转型与创新关联起来。相关研究主要从企业层面考察数字化转型对创新的影响,并从不同角度阐释其内在机理。企业融入全球创新网络这一开放式创新行为进入研究视野,被认为是数字化转型促使企业创新绩效显著提升的重要途径^[22]。有学者指出组织重构和机会感知等动态能力是数字化转型提升企业创新绩效的桥梁^[23],也有学者基于模块化视角提出产品架构与组织架构是联结数字化转型与企业创新绩效的渠道^[24],还有学者强调资源利用效率的传导作用,认为数字化转型主要通过降低组织资源的冗余水平来提升企业创新绩效^[25]。此外,部分研究从研发国际化战略布局角度解释了数字化转型对企业创新绩效的积极作用^[26],另有研究从社会认知角度指出数字化转型与企业创新绩效之间存在非线性关系,该关系受员工个人认知和组织认知的调节从而呈现“U”型^[27]。

通过上述文献梳理可以发现,学术界围绕数字化转型的内涵与外延、前置影响因素进行了大量探索,提供了丰富有益的引导性理论参考,而关于其后置影响效应及其影响机制的研究有待深化。本文研究可能在以下三个方面与既有研究有所区别:第一,不同于以往文献主要分析产业内和产业外因素对创新的影响,本文基于产业融合视角拓宽创新的影响因素范畴,考察制造业数字化转型的创新效应,丰富创新的影响因素研究;第二,既有研究着重考察数字化转型的经济效应差异,但对其异质性创新效应的关注相对不足,本文基于行业和投入的双重异质性角度甄别数字化转型对创新的差异化影响,为综合准确评估数字化转型的经济效应提供经验证据;第三,不同于部分文献从单一角度探讨数字化转型赋能创新的微观机理,本文从行业层面基于市场、技术、产品三个维度解释数字化转型对制造业创新的影响路径与逻辑,对扎实推进数字化转型进程和解决制造业创新的痛点问题具有重要的政策启示。

二、理论假设

(一) 数字化转型的创新效应

数字化转型对创新的影响主要体现在降本和增效两个方面:一是降低创新成本。制造业数字化转型突破了产业间壁垒,提高了各行业对外部资源的可获取性,从供给侧提高了创新环节所需资源的数量和质量,有效削减了投入不足或投入冗余所导致的额外成本。同时,创新过程往往伴随着大量的信息需求,而互联网、云计算、大数据等数字技术的推广和应用则实现了信息检索过程的智能化与定制化,削弱过载信息处理的复杂性^[28],极大程度降低了信息获取成本。二是提高创新效率。数字要素的流通和数字技术的使用放宽了信息、知识的专用性约束,实现了数据共享,制造业各行业借助研发溢出的正外部性不仅进一步增加了自身知识存量,大幅缩短创新所需的知识储备时间,还降低了市场供需信息的不对称程度,强化生产者与消费者的关联互动,促使行业以满足消费为导向来动态调整创新方向和创新目标,推动创新模式由粗放型向精

准型转变^[29],压缩研发周期以高效提升创新速率。

基于此,本文提出如下假设:

数字化转型对制造业创新具有促进作用(H1)。

(二) 数字化转型的异质性创新效应

数字化转型赋能创新的关键在于数字技术的嵌入,其嵌入程度取决于数字要素与传统要素的替代或互补关系,因此,制造业各行业的要素禀赋可能导致数字化转型的创新效应存在行业异质性。对于劳动资源密集型行业而言,数字要素与普通劳动力之间具有较强替代性,数字技术可应用于取代人工完成重复烦琐的程序化业务,却难以渗透研发环节,且数字化转型需要巨额资金作为支撑,这在一定程度上冲抵了该行业的劳动力低成本优势,其结果很可能是提升了行业生产效率,未必有助于行业创新。而数字要素与资本技术密集型行业的高技能劳动力以及物化资本即机器设备之间具有较强互补性^[18],有助于高技能人才借助数字技术提高研发效率,并节省人力物力为创新拓展空间。

数字化转型可根据投入构成划分为硬件、软件数字化转型,硬件数字化转型指数字产品设备等基础设施的优化,软件数字化转型即数字服务管理等技术平台的改善。高效的软件服务平台有助于制造业对各业务环节的数据进行适时捕捉和智能分析,基于业务流程和组织模式推动物流、信息流与价值流之间的紧密衔接和协同创新。但是,数据的收集、存储、传输必以完善的硬件基础设施为依托,数字产品设备的优化不仅可以提高数据获取的综合能力,还能够扩大数据流通范围、提升数据流通效率,为数据安全提供有力支撑,是实现创新的最根本保障^[30]。因此,与软件数字化转型相比较,硬件数字化转型对创新的影响程度应该更高。

基于此,本文分别提出如下假设:

数字化转型的创新效应具有行业异质性(H2a);

数字化转型的创新效应具有投入异质性(H2b)。

(三) 数字化转型影响创新的传导机制

数字化转型是重塑业务流程的过程,可以通过对管理流程数据的智能聚合来完善组织结构,还能够通过对销售流程数据的精准分析来优化决策机制,为内部管理效率、市场销售效率的提高持续提供强大动力,从而扩充本土市场规模的空间和容量。进一步地,本土市场规模的扩大引发了专业分工、行业集聚的新一轮演化周期^[31],行业劳动生产率得以提高,市场竞争随之愈发激烈,行业内部企业争夺市场控制力的意愿也愈发强烈,倾向于通过创新抢占市场份额。因此,市场规模效应是数字化转型影响创新的重要途径。

数字化转型开启了数字技术对制造业的全方位渗透,加快了以新代旧的技术改造升级步伐^[32]。根据技术差距理论,行业内部处于技术领先的企业具有维护其优势地位的意愿,而后发企业也具备技术赶超的诉求,由此强化了行业内部的技术竞争,同时,某一行业的技术改造升级行为也将蔓延至关联行业,其上下游行业会对既有技术进行改进以使生产工艺相配套。技术改造升级有加强自主研发和借助外部引进两大主线,自主研发可以培育行业的自主创新能力,而通过外部引进能够在其基础上实现二次创新,无论哪种方式实现的技术改造升级均能对创新产生积极影响。因此,技术改造效应是数字化转型作用于创新的中介渠道。

黏性消费增长理论认为,不完全信息市场下的需求具有滞后性,极易导致劣质产品驱逐优质产品的局面出现。数字化转型推动信息结构由迟滞化、碎片化向扁平化、网络化演进,增强了信息流通和市场透明度,促进了供给与需求的良性互动^[30]。一方面,在需求牵引供给的价值维度下,生产者搭建以消费需求为驱动的产品柔性制造体系,根据客户偏好加速新产品开发;另一方面,在供给创造需求的改革理念下,生产者结合消费大数据和客户体验反馈,对产品进行改良以满足高质量消费需求,并通过市场预测指导产品研发,而行业的创新能力也在产品革新开发过程中得以提升。因此,产品革新效应在数字化转型与创新之间具有传导作用。

基于此,本文提出以下假设:

数字化转型扩大本土市场规模引致创新(H3a);

数字化转型通过技术改造升级推动创新(H3b);

数字化转型引领产品革新开发促进创新(H3c)。

三、研究设计

(一) 模型构建

根据本文研究目的,借鉴相关研究方法构建中介效应模型^[33],如式(1)~式(3)所示。由于制造业各行业发展特征各异,可能导致变量观测值差异较大,因此宜取其对数进入模型以降低样本异方差程度。

$$\ln iv_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln dt_{it} + \alpha_2 \ln X_{it} + \mu_{it} \quad (1)$$

$$\ln M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln dt_{it} + \beta_2 \ln X_{it} + \nu_{it} \quad (2)$$

$$\ln iv_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln dt_{it} + \gamma_2 \ln M_{it} + \gamma_3 \ln X_{it} + \sigma_{it} \quad (3)$$

其中: i 、 t 分别为行业、年份; μ 、 ν 、 σ 均为残差项; iv 为被解释变量即创新产出; dt 为核心解释变量即数字化转型; X 为控制变量; M 为中介变量; α_1 为核心解释变量对被解释变量的总效应,理论上该效应可分解为直接效应与间接效应; β_1 为核心解释变量对中介变量的效应; γ_1 为在控制了中介变量影响后的核心解释变量对被解释变量的直接效应; γ_2 为在控制了核心解释变量影响后的中介变量对被解释变量的效应,如此则核心解释变量对被解释变量的间接效应亦即中介效应为 $\gamma_2\beta_1$ 。式(1)可用于检验制造业数字化转型对其创新的影响方向与程度,在此基础上依次运用式(2)、式(3)可以检验数字化转型对创新施以影响的实现机制。在 α_1 显著的前提下,若 β_1 、 γ_2 均显著,则表明中介效应显著,即数字化转型通过变量 M 影响了制造业创新;当 γ_1 显著且小于 α_1 时,表明存在部分中介效应,即变量 M 在数字化转型对创新的影响过程中起到了一定的传导作用,中介效应占总效应比重为 $\gamma_2\beta_1/(\gamma_1+\gamma_2\beta_1)$;当 γ_1 不显著时,表明存在完全中介效应,即数字化转型对创新施以影响完全通过变量 M 传导而实现。

(二) 变量选取

1. 被解释变量

创新(iv)。新产品以及专利常被用以衡量创新产出,相较而言专利可以反映自主知识产权,发明、实用新型、外观设计三种专利中又以发明专利的代表性较强^[34],因此选取有效发明专利数衡量创新。

2. 核心解释变量

数字化转型(dt)。数字化转型程度取决于数字化产品或服务的投入^[35],因此采用制造业各行业对通信设备计算机和其他电子设备制造业、信息传输和软件信息技术服务业的直接消耗系数作为数字化转型的指标,直接消耗系数为中间投入与总投入之比。

3. 中介变量

本土市场规模(mk)。“市场促创新”的假说已在相关研究中得以验证^[31],本文以工业销售产值中本土市场销售产值所占比重作为本土市场规模的指标,本土市场销售产值为工业销售产值与出口交货值之差。技术改造升级(tc)。技术改造升级有广义与狭义之分,狭义层面指设备、工艺方面的改进,广义层面还包括管理、规制方面的优化。本文关注的是狭义的技术改造升级,因此以技术改造经费支出作为其衡量指标。产品革新开发(np)。产品革新开发是指新型产品的研究设计与试验开发,在数字化转型与创新之间可能具有传导作用,本文以新产品开发经费支出对其予以衡量。

4. 控制变量

资产负债率(db)。负债融资是获得创新投资的重要方式之一,适度的负债有助于创新活动的顺利进行,本文以负债合计与资产总计的比值作为资产负债率的指标。外商投资(fi)。外商投资以资本为载体,引进了先进技术和设备,其溢出效应的存在性已得到广泛认可,对创新具有促进作用,本文以外商资本作为其指标。人力资本(rp)。研发人力资本在创新能力建设过程中不可或缺,是影响创新产出的关键因素,以全部从业人员中研发人员所占比重表示。研发经费(rf)。创新活动需要动用大量的资金作为支撑,因此创新产出在一定程度上取决于研发经费,本文以研发经费内部与外部支出对其度量。盈利能力(pr)。盈利能力与创新呈正相关关系,收入利润率是盈利能力的直观反映,以利润总额与主营业务收入之比表示,采用该指标

度量盈利能力。资产规模(*sz*)。具有较大资产规模的行业,越能发挥规模经济的正外部性,对创新产出具有正向影响,本文选取人均固定资产净值作为其衡量指标。

(三) 数据说明

本文采用 2005—2020 年中国制造业细分行业的面板数据,核心解释变量数据来自《国家投入产出表》,其余变量数据来自《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和《中国统计年鉴》,缺失数据以插值法补齐。为了保持数据统计的一致性,需要将上述数据来源中的制造业分类标准进行对应,共得到 16 个制造业细分行业:食品制造及烟草加工业、纺织业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业、木材加工及家具制造业、造纸印刷及文教体育用品制造业、石油加工炼焦及核燃料加工业、化学工业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、金属制品业、通用及专用设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、通信设备计算机及其他电子设备制造业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、工艺品和其他制造业。上述变量描述性统计如表 1 所示。

表 1 变量描述性统计

变量	符号	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
创新	<i>iv</i>	256	2.9165	5.6827	0.0108	40.224
数字化转型	<i>dt</i>	256	0.0505	0.1232	0.0001	0.5207
本地市场规模	<i>mk</i>	256	0.8359	0.1507	0.2678	0.9903
技术改造升级	<i>tc</i>	256	0.0201	0.0252	0.0004	0.1587
产品革新开发	<i>np</i>	256	0.0532	0.0690	0.0006	0.4064
资产负债率	<i>db</i>	256	0.5578	0.0851	0.3284	1.2414
外商投资	<i>fi</i>	256	0.1195	0.1226	0.0046	0.5009
人力资本	<i>rp</i>	256	0.0321	0.0258	0.0010	0.1281
研发经费	<i>rf</i>	256	0.0481	0.0606	0.0003	0.3257
盈利能力	<i>pr</i>	256	0.0609	0.0174	0.0019	0.1090
资产规模	<i>sz</i>	256	0.2358	0.2342	0.0060	1.5026

四、实证分析

(一) 基准回归分析

计量回归之前,需对两个问题进行确认,一是是否存在多重共线性,二是如何选择合理的回归方法。为此,首先检验解释变量间的相关性,其相关系数均小于 0.8,进一步检验方差膨胀因子,*VIF* 均值小于 10,根据经验法则,确认不存在严重多重共线性。随后,面板数据常使用普通最小二乘法(*OLS*)、随机效应(*RE*)、固定效应(*FE*)三种回归方法,经 *LM* 和 *Hausman* 检验,固定效应回归优于前二者,因此,本文采用同时控制行业效应和时间效应的双向固定效应模型。数字化转型影响制造业创新的基准回归结果如表 2 所示。(1)列仅包含核心解释变量,为缓解遗漏变量所导致的估计误差,在(2)列~(7)列依次加入其他控制变量。回归结果显示,引入控制变量前后,核心解释变量的系数值有了微弱变化,但均通过了 1%水平的显著性检验,表明数字化转型明显促进了制造业创新,该结论支持了假设 H1。这可能得益于数字化转型打破了产业边界,提高了资源和信息的可得性,促使创新成本降低以及创新效率提升。

关于控制变量的解释:资产负债率的估计系数显著为负,表明其对创新具有明显的抑制作用,这与预期不符,对此可能的解释为,虽然负债可作为创新融资的重要渠道,但过高的负债率会降低收益留存,打击行业创新的积极性,削弱其创新动机。外商投资具有正向的创新效应,可能是因为外商拥有的先进技术、设备、管理以及制度伴随投资行为发生了跨国转移,通过溢出效应促进了东道国的行业创新。人力资本对创新表现为正向影响,说明从业人员研发素质的提升能够增强制造业创新能力。研发经费的系数不显著,可能与研发周期长、投入大且失败率高等特征有关,导致其对创新的促进作用不明显。盈利能力、资产规模均未通过显著性检验,表明创新对二者变动不敏感,主要原因可能在于,盈利能力并未适时转化为创新动力,而资产规模扩大的目的在于维持市场地位却未能引发创新竞争。

表 2 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
$\ln dt$	0.226 *** (0.050)	0.233 *** (0.049)	0.207 *** (0.050)	0.218 *** (0.049)	0.220 *** (0.051)	0.220 *** (0.051)	0.221 *** (0.051)
$\ln db$		-0.463 ** (0.182)	-0.455 ** (0.180)	-0.408 ** (0.177)	-0.407 ** (0.178)	-0.407 ** (0.179)	-0.371 ** (0.184)
$\ln fi$			0.234 ** (0.092)	0.423 *** (0.109)	0.411 *** (0.131)	0.411 *** (0.131)	0.420 *** (0.132)
$\ln rp$				0.255 *** (0.083)	0.242 ** (0.118)	0.242 ** (0.118)	0.266 ** (0.122)
$\ln rf$					0.021 (0.130)	0.021 (0.130)	0.001 (0.133)
$\ln pr$						0.002 (0.068)	0.005 (0.068)
$\ln sz$							-0.068 (0.084)
$cons$	7.656 *** (0.211)	7.432 *** (0.227)	5.936 *** (0.629)	6.174 *** (0.622)	6.109 *** (0.741)	6.118 *** (0.784)	6.436 *** (0.877)
Industry FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
R^2	0.958	0.959	0.960	0.962	0.962	0.962	0.962

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著；括号内为相应的标准误。

(二) 稳健性检验

为验证基准回归结果是否稳健,本文分别采用更换估计方法、替换变量指标、剔除异常值进行了一系列稳健性检验,其结果如表 3 所示。首先,运用面板工具变量法(IV-2SLS)对可能的内生性问题进行处理。虽然基准分析得出了“数字化转型促进创新”的结论,但需考虑是否存在“创新反向影响数字化转型”的情形,否则数字化转型与创新之间的双向因果关系会导致回归结果偏差。因此,以数字化转型的滞后一期作为工具变量,对模型进行两阶段最小二乘估计,结果显示,核心解释变量的系数符号及其显著性未发生变化,且 F 统计量为 58.8(大于经验值 10),表明不存在弱工具变量问题,可见前文结论具有稳健性。其次,以发明专利申请数替换有效发明专利数作为被解释变量的度量指标。代入模型重新回归后发现,核心解释变量的系数依然为正,且通过了显著性检验。再次,以相对量指标替换绝对量指标度量核心解释变量。选取通信设备计算机和其他电子设备制造业、信息传输和软件信息技术服务业在制造业各行业的中间投入表示数字化转型,其回归结果与前文基本保持一致。最后,由于制造业各行业的不平衡发展,行业间创新能力和数字化转型程度可能存在较大差异,不得不考虑极端值对估计结果的影响。因此,对被解释变量和核心解释变量的样本观测值均作 1% 的双侧截尾处理,数字化转型的估计系数仍显著为正,表明前文回归未受到极端值的实质性影响。上述检验结果表明,“数字化转型促进创新”这一结论具有稳健性。

表 3 稳健性检验结果

变量	(1) IV-2SLS	(2) 替换被 解释变量	(3) 替换核心 解释变量	(4) 剔除 极端值
$\ln dt$	0.239 *** (0.059)	0.093 ** (0.041)	0.264 *** (0.051)	0.207 *** (0.054)
$\ln db$	-0.243 (0.178)	-0.251 * (0.147)	-0.322 * (0.181)	-0.323 * (0.185)
$\ln fi$	0.411 *** (0.132)	0.264 ** (0.106)	0.318 ** (0.134)	0.424 *** (0.132)
$\ln rp$	0.176 (0.122)	0.275 *** (0.098)	0.280 ** (0.119)	0.249 ** (0.126)
$\ln rf$	0.101 (0.132)	0.491 *** (0.106)	-0.063 (0.127)	0.006 (0.134)
$\ln pr$	0.039 (0.067)	-0.073 (0.055)	0.027 (0.067)	0.031 (0.072)
$\ln sz$	-0.048 (0.081)	0.027 (0.067)	-0.059 (0.083)	-0.071 (0.085)
$cons$	6.149 *** (0.908)	4.006 *** (0.702)	5.068 *** (0.835)	6.398 *** (0.902)
Industry FE	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y
R^2	0.960	0.969	0.963	0.961

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著；括号内为相应的标准误。

(三) 异质性分析

为检验不同行业的数字化转型的创新效应差异,本文根据要素集聚形式将制造业划分为劳动资源密集型行业和资本技术密集型行业,前者包括食品制造及烟草加工业、纺织业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业、木材加工及家具制造业、非金属矿物制品业、金属制品业、工艺品和其他制造业,后者涵盖其余行业。根据表4的(1)列、(2)列估计结果的展示,数字化转型明显抑制了劳动资源密集型行业创新,却显著促进了资本技术密集型行业创新,且组间系数差异在1%的水平下显著。该结果表明数字化转型的创新效应具有行业异质性,假设H2a成立,这可能是由数字要素与不同行业的固有优势之间分别具有替代性、互补性所决定的。由于数字化转型需要大量的资金支持,在一定程度上会冲抵甚至遮掩了劳动资源密集型行业的低成本优势,导致生产运营成本提高,降低了行业创新积极性。而资本技术密集型行业以资金和技术优势见长,数字化转型可以优化资金利用效率并强化行业的技术优势,进而提升了行业创新动机。

为检验不同投入的数字化转型的创新效应差异,本文将数字化转型划分为硬件数字化转型和软件数字化转型,分别以制造业各行业对通信设备计算机和其他电子设备制造业、信息传输和软件信息技术服务业的直接消耗系数表示。表4的(3)列、(4)列分别展示了硬件、软件数字化转型的估计结果,二者对制造业创新均表现为正向影响,但与软件数字化转型相比,硬件数字化转型的创新效应更强也更为明显,其系数差异在10%的水平下显著。该结果表明数字化转型的创新效应表现出投入异质性,假设H2b成立。其原因可能在于,软件数字化转型的重点在于数字技术服务的改善,其对创新的推动作用主要表现在后期的业务流程紧密衔接与协同方面,而硬件数字化转型以数字产品设备的优化为核心,贯穿了数据由生成到记录再到传送的全过程。这不仅是软件数字化转型的前提,也是提升数据流通效率以实现创新的最根本保障。

表4 异质性回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	劳动资源 密集型行业	资本技术 密集型行业	硬件数字 化转型	软件数字 化转型
<i>ln_{dt}</i>	-0.363 *** (0.126)	0.362 *** (0.059)	0.106 *** (0.041)	0.092 * (0.048)
<i>ln_{db}</i>	0.070 (0.405)	-0.337 * (0.204)	-0.389 ** (0.190)	-0.320 * (0.191)
<i>ln_{fi}</i>	0.824 *** (0.203)	0.176 (0.167)	0.496 *** (0.133)	0.533 *** (0.133)
<i>ln_{rp}</i>	0.622 ** (0.246)	0.595 *** (0.171)	0.315 ** (0.124)	0.348 *** (0.125)
<i>ln_{rf}</i>	-0.258 (0.198)	-0.667 *** (0.217)	-0.418 (0.137)	-0.157 (0.133)
<i>ln_{pr}</i>	-0.215 (0.290)	0.092 (0.069)	0.007 (0.071)	-0.018 (0.070)
<i>ln_{sz}</i>	-0.138 (0.253)	-0.064 (0.087)	-0.078 (0.087)	-0.051 (0.087)
<i>cons</i>	3.703 ** (1.813)	3.338 *** (1.551)	6.079 *** (0.902)	6.207 *** (0.961)
Industry FE	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y
<i>R</i> ²	0.973	0.970	0.960	0.960
系数差异 <i>P</i>	0.000 ***		0.089 *	

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著;括号内为相应的标准误;系数差异*P*根据似不相关估计得到。

五、机制分析

根据前文文献梳理与理论假设,市场环境、技术获取、研发投入是影响创新的重要因素,而数字化转型重塑了市场、技术、产品的资源价值,可以促进市场边界延伸、技术水平提升和新产品研发推动创新。因此,本文拟以本土市场规模、技术改造升级、产品革新开发为传导渠道,检验其在数字化转型与创新之间的中介作用。机制检验需结合模型设定继续进行逐步回归,式(1)的实证结果已在前文展示,因此着重对式(2)、式(3)进行回归。

(一) 市场规模效应

基于市场规模效应的创新传导机制检验结果如表5所示。在以本土市场规模为被解释变量的回归中,数字化转型的系数显著为正,表明数字化转型有助于扩张本土市场规模;当以创新为被解释变量时,数字化转型与本土市场规模的系数均为正,且通过了1%的显著性检验,表明数字化转型与本土市场规模对创新都产生了积极影响。这意味着本土市场规模在数字化转型影响创新的过程中起到了部分中介作用,根据估计结果计算,中介效应为0.039,占总效应0.221的17.5%,假设H3a得以验证。这可能是由于数字技术的应用提升了制造业行业的管理效率和销售效率,为市场规模的拓展注入了新的动能,进而引发了市场主体为抢

表 5 本土市场规模的传导机制检验

变量	数字化转型		硬件数字化转型		软件数字化转型	
	lnmk	lniv	lnmk	lniv	lnmk	lniv
lnmk		0.622 *** (0.195)		0.752 *** (0.192)		0.735 *** (0.203)
lndt	0.062 *** (0.017)	0.182 *** (0.052)	0.014 (0.014)	0.096 ** (0.040)	0.071 *** (0.016)	0.040 (0.049)
lndb	-0.045 (0.063)	-0.343 * (0.181)	-0.043 (0.065)	-0.357 * (0.184)	-0.017 (0.062)	-0.307 * (0.186)
lnfi	-0.228 *** (0.045)	0.562 *** (0.137)	-0.197 *** (0.045)	0.644 *** (0.135)	-0.207 *** (0.043)	0.685 *** (0.136)
lnrp	-0.029 (0.042)	0.284 ** (0.120)	-0.012 (0.042)	0.325 *** (0.120)	0.003 (0.041)	0.346 *** (0.122)
lnrf	0.083 * (0.045)	-0.051 (0.131)	0.056 (0.047)	-0.084 (0.133)	0.029 (0.043)	-0.178 (0.130)
lnpr	0.079 *** (0.023)	-0.044 (0.069)	0.073 *** (0.024)	-0.048 (0.070)	0.080 *** (0.023)	-0.076 (0.070)
lnsz	0.002 (0.029)	-0.070 (0.082)	0.002 (0.029)	-0.079 (0.084)	0.013 (0.028)	-0.061 (0.085)
cons	1.054 *** (0.299)	5.780 *** (0.883)	0.857 *** (0.307)	5.435 *** (0.889)	1.362 *** (0.312)	5.207 *** (0.976)
中介效应	部分中介效应 (17.5%)		无中介效应		完全中介效应	
Industry FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
R ²	0.550	0.964	0.523	0.963	0.565	0.962

注: ***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著;括号内为相应的标准误。

占市场份额的创新竞争。因此,数字化转型对创新不仅具有直接的促进作用,还能够以本土市场规模为传导渠道间接地推动创新。

硬件数字化转型对本土市场规模的影响不显著,表明市场规模效应并非硬件数字化转型促进创新的传导渠道。软件数字化转型助力本土市场规模扩大,但对创新的直接作用不明显,表明软件数字化转型对创新的促进作用完全依赖于本土市场规模的传导。换言之,本土市场规模在软件数字化转型与创新之间具有完全中介效应。导致这一差异的原因可能在于,市场规模的拓展以内部管理效率和市场销售效率的提高为前提,效率提升离不开对管理、销售数据的智能聚合与精准分析,这主要依靠数字技术服务、数字管理平台发挥作用,即在该过程中居主导地位的是软件数字化转型。

(二) 技术改造效应

表 6 展示了基于技术改造效应的创新传导机制检验结果。该结果包括两层含义:第一,数字化转型加快了制造业技术改造升级;第二,技术改造升级、数字化转型均是创新的正向影响因素。在数字化转型的创新效应已经得证的前提下,结合中介模型蕴含的效应意义可以推断,数字化转型对创新的总效应可分解为直接效应和以技术改造升级为间接渠道的中介效应,根据相关数据计算可得,中介效应为 0.017,占总效应的 7.5%。以上为假设 H3b 提供了有力论据,表明数字化转型能够通过技术改造升级推动创新,其原因可能在于数字化转型带动了行业内部技术竞争,并促使上下游行业跟进配套技术改良,进而对创新产生了促进作用。

表 6 技术改造升级的传导机制检验

变量	数字化转型		硬件数字化转型		软件数字化转型	
	lntc	lniv	lntc	lniv	lntc	lniv
lntc		0.135 ** (0.064)		0.141 ** (0.067)		0.170 *** (0.065)
lndt	0.123 ** (0.054)	0.204 *** (0.051)	0.147 *** (0.041)	0.085 ** (0.042)	0.020 (0.050)	0.089 * (0.048)
lndb	-0.178 (0.193)	-0.347 * (0.183)	-0.224 (0.191)	-0.358 * (0.189)	-0.159 (0.196)	-0.293 (0.188)
lnfi	-0.056 (0.138)	0.428 *** (0.131)	-0.062 *** (0.134)	0.505 *** (0.132)	0.015 (0.136)	0.530 *** (0.131)
lnrp	-0.334 *** (0.128)	0.311 ** (0.123)	-0.319 ** (0.125)	0.361 *** (0.125)	-0.294 ** (0.129)	0.398 *** (0.125)
lnrf	0.849 *** (0.139)	-0.114 (0.142)	0.904 *** (0.138)	-0.170 (0.149)	0.767 *** (0.137)	-0.287 ** (0.141)
lnpr	0.099 (0.072)	-0.008 (0.068)	0.133 * (0.072)	-0.012 (0.071)	0.081 (0.072)	-0.032 (0.070)
lnsz	-0.001 (0.088)	-0.068 (0.084)	-0.019 (0.087)	-0.075 (0.086)	0.004 (0.090)	-0.052 (0.086)
cons	0.440 (0.921)	6.376 *** (0.871)	0.763 (0.908)	5.971 *** (0.896)	0.051 (0.988)	6.199 *** (0.948)
中介效应	部分中介效应 (7.5%)		部分中介效应 (19.6%)		无中介效应	
Industry FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
R ²	0.447	0.963	0.465	0.961	0.434	0.961

注: ***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著;括号内为相应的标准误。

技术改造升级是硬件数字化转型发挥创新效应的中介机制,中介效应为 0.021,占总效应的 19.6%。但软件数字化转型与技术改造升级并无明显的相关关系,表明软件数字化转型未能通过技术改造升级对创新施以影响。该差异形成的原因可能如下:相较于数字服务管理改善为主的软件数字化转型而言,以数字产品设备优化为主的硬件数字化转型不仅加速数字要素与传统要素的融合,还能够提升既有技术使用效率,以效率为导向实现技术创新。

(三) 产品革新效应

表 7 为基于产品革新效应的创新传导机制检验结果。结果显示,数字化转型不仅直接促进了制造业创新,还引领了产品革新开发,从而对创新产生了间接的积极影响。通过计算得出,中介效应为 0.03,占总效应的 13.8%,表明产品革新开发是数字化转型作用于创新的中介渠道,支持了假设 H3c 的猜想。这可能得益于数字化转型弱化了市场信息的不对称程度,加强了供给与需求的良性互动,推进了新产品开发,制造业的创新能力在该过程中得以提升。

硬件数字化转型对创新的促进作用部分依赖于产品革新开发,其中介效应为 0.023,占总效应的 21.9%;产品革新开发在软件数字化转型推动创新的过程中发挥了完全中介效应,表明产品革新效应是硬件、软件数字化转型对创新施以影响的传导机制之一。这可能是因为数字产品设备和数字技术服务均能在一定程度上弥合生产与消费之间的鸿沟,促使行业以市场为导向加速产品研发,从而提高创新产出。

表 7 产品革新开发的传导机制检验

变量	数字化转型		硬件数字化转型		软件数字化转型	
	lnnp	lniv	lnnp	lniv	lnnp	lniv
lnnp		0.462 ** (0.206)		0.569 *** (0.207)		0.599 *** (0.208)
lnidt	0.066 *** (0.017)	0.190 *** (0.053)	0.041 *** (0.013)	0.083 ** (0.041)	0.048 *** (0.015)	0.063 (0.048)
lnldb	-0.039 (0.060)	-0.353 * (0.183)	-0.048 (0.061)	-0.362 * (0.187)	-0.018 (0.061)	-0.309 (0.188)
lnfi	0.016 (0.043)	0.412 *** (0.131)	0.034 (0.043)	0.477 *** (0.132)	0.045 (0.042)	0.506 *** (0.131)
lnrp	-0.045 (0.040)	0.287 ** (0.121)	-0.031 (0.040)	0.333 *** (0.123)	-0.016 (0.040)	0.358 *** (0.123)
lnrf	0.891 *** (0.043)	-0.411 * (0.226)	0.886 *** (0.044)	-0.546 ** (0.228)	0.840 *** (0.043)	-0.659 *** (0.219)
lnpr	-0.106 *** (0.022)	0.054 (0.071)	-0.102 *** (0.023)	0.065 (0.073)	-0.110 *** (0.023)	0.048 (0.073)
lnsz	-0.054 * (0.027)	-0.043 (0.084)	-0.058 ** (0.028)	-0.045 (0.086)	-0.046 (0.028)	-0.024 (0.086)
cons	0.349 (0.286)	6.274 *** (0.872)	0.294 (0.291)	5.912 *** (0.890)	0.450 (0.307)	5.938 *** (0.950)
中介效应	部分中介效应 (13.8%)		部分中介效应 (21.9%)		完全中介效应	
Industry FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Year FE	Y	Y	Y	Y	Y	Y
R ²	0.991	0.963	0.991	0.961	0.991	0.961

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著;括号内为相应的标准误。

六、结论与建议

本文以 2005—2020 年的中国制造业为研究对象,采用双向固定效应模型、中介效应模型检验了数字化转型对创新的影响及其机制,得出了以下结论:第一,数字化转型具有显著的创新效应,经过一系列稳健性检验后这一观点仍然成立。该结论是对创新影响因素研究的有力补充,将数字化转型纳入创新影响因素体系,突破了产业内或产业外单一视角的局限,凸显了从产业融合视角挖掘创新动能的重要性和必要性。第二,数字化转型的创新效应表现出行业和投入异质性,一方面,数字化转型抑制了劳动资源密集型行业创新,但对资本技术密集型行业创新呈正向影响;另一方面,硬件数字化转型相较软件数字化转型的创新效应更强。该结论刻画了数字化转型影响创新的差异化特征,丰富了数字化转型的后置影响效应研究,为全面评估数字化转型的经济效应提供了经验证据。第三,市场规模效应、技术改造效应、产品革新效应是数字化转型推动制造业创新的三大渠道,其中,硬件数字化转型可引致技术改造升级和产品革新开发促进创新,而软件数字化转型则通过本土市场规模扩大和产品革新开发带动创新。该结论证实了市场、技术、产品在数字化转型与创新之间的传导作用,拓展了数字化转型赋能创新的机制研究,从行业层面揭示了数字化转型

对创新的影响路径与逻辑。

上述结论所蕴含的政策启示同样值得关注,本文有针对性地提出以下建议:第一,坚持推进产业数字化战略,推动“数字赋能创新”前瞻性布局。强化战略部署与顶层设计,以创新为导向加速数字化转型进程,促进数字要素与传统要素充分融合,为制造业创新发展提供新型内生动力。第二,避免过度数字化竞争,夯实数字基础设施建设。鼓励各行业根据要素禀赋以数字化转型为契机发挥比较优势,引导其摒弃同质竞争理念,在转型过程中结合自身实际,有序实现硬件数字化转型再到软件数字化转型,规避过度数字化风险。加大数字公共基础设施投资,对有意愿转型的企业给予政策扶持和财税优惠,并提供必要的指导和资讯,促使其完善数字产品设备,为其长期转型工作打下坚实基础。第三,重视数字化转型的创新渠道,打造良性循环的创新生态环境。持续优化营商环境,加快构筑统一大市场,不断提高市场效率,为市场扩容拓展通道。关注先进技术研发,与外界保持科技沟通交流,形成技术吸收能力与核心能力之间的双向反馈,为技术改造升级提供相应的技术吸收能力。构建“产品-市场”联动机制,畅通内外部信息来源,扩展信息的广度与深度,挖掘产品潜在价值并制定相应研发策略,加快新产品精准开发。

参考文献

- [1] ARDOLINO M, RAPACCINI M, SACCANI N, et al. The role of digital technologies for the service transformation of industrial companies[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(6): 2116-2132.
- [2] ESCRIBANO A, FOSFURI A, TRIBO J A. Managing external knowledge flows: The moderating role of absorptive capacity[J]. *Research Policy*, 2009, 38(1): 96-105.
- [3] KOELLER C T. Innovation, market structure and firm size: A simultaneous equations model[J]. *Managerial and Decision Economics*, 1995, 16(3): 259-269.
- [4] HALL B H, LOTTI F, MAIRESSE J. Evidence on the impact of R&D and ICT investments on innovation and productivity in Italian firms[J]. *Economics of Innovation and New Technology*, 2013, 22(3): 300-328.
- [5] NELSON R R, PHELPS E S. Investment in humans, technological diffusion, and economic growth[J]. *The American Economic Review*, 1996, 86(1/2): 69-75.
- [6] HURWITZ J, LINES S, MONTGOMERY B, et al. The linkage between management practices, intangibles performance and stock returns[J]. *Journal of Intellectual Capital*, 2002, 3(1): 51-61.
- [7] 谭用, 邱斌, 叶迪, 等. 中国创新模式选择: 自主创新抑或技术引进? [J]. *经济研究*, 2024, 59(4): 113-132.
- [8] HUBER J. Pioneer countries and the global diffusion of environmental innovations: Theses from the viewpoint of ecological modernization theory [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(3): 86-132.
- [9] LEVINE R. Stock markets, banks and economic growth: Schumpeter might be right[J]. *American Economic Review*, 1998, 88(3): 537-558.
- [10] TEBALDI E, ELSMLIE B. Does institutional quality impact innovation? Evidence from cross-country patent grant data[J]. *Applied Economics*, 2013, 45(7): 887-900.
- [11] 聂国卿, 郭晓东. 环境规制对中国制造业创新转型发展的影响[J]. *经济地理*, 2018, 38(7): 110-116.
- [12] 孔存玉, 丁志帆. 制造业数字化转型的内在机理与实现路径[J]. *经济体制改革*, 2021(6): 98-105.
- [13] LI L, SU F, ZHANG W, et al. Digital transformation by SME entrepreneurs: A capability perspective[J]. *Information Systems Journal*, 2018, 28(6): 1129-1157.
- [14] 肖旭, 戚聿东. 产业数字化转型的价值维度与理论逻辑[J]. *改革*, 2019(8): 61-70.
- [15] 祝合良, 王春娟. “双循环”新发展格局战略背景下产业数字化转型: 理论与对策[J]. *财贸经济*, 2021, 42(3): 14-27.
- [16] 李秀敏, 陈梓烁, 陈雅琪. 企业数字化转型与财务绩效——来自上市公司数字专利数据的证据[J]. *技术经济*, 2024, 43(1): 73-87.
- [17] 张伟, 王韶华. 中国制造业数字化投入的异质性经济效应研究[J]. *经济体制改革*, 2022(1): 103-110.
- [18] 党琳, 李雪松, 申烁. 制造业行业数字化转型与其出口技术复杂度提升[J]. *国际贸易问题*, 2021(6): 32-47.
- [19] 刘飞. 数字化转型如何提升制造业生产率——基于数字化转型的三重影响机制[J]. *财经科学*, 2020(10): 93-107.
- [20] 陈晓东, 杨晓霞. 数字经济可以实现产业链的最优强度吗? ——基于 1987—2017 年中国投入产出表面板数据[J]. *南京社会科学*, 2021(2): 17-26.
- [21] 张晴, 于津平. 制造业投入数字化与全球价值链中高端跃升——基于投入来源差异的再检验[J]. *财经研究*, 2021, 47(9): 93-107.
- [22] 李雪松, 党琳, 赵宸宇. 数字化转型、融入全球创新网络与创新绩效[J]. *中国工业经济*, 2022(10): 43-61.
- [23] 张方华, 李子昂. 数字化转型、动态能力与创新绩效[J]. *创新科技*, 2023, 23(3): 66-77.
- [24] 郑帅, 王海军. 数字化转型何以影响枢纽企业创新绩效? ——基于模块化视角的实证研究[J]. *科研管理*, 2022, 43(11): 73-82.
- [25] 李德辉, 潘丽君, 尚铎. 企业数字化转型、冗余资源与创新产出——基于中国非金融上市公司的考察[J]. *软科学*, 2022(10): 1-11.
- [26] 温科, 李常洪, 曾建丽. 数字化转型、研发国际化与企业创新绩效[J]. *技术经济*, 2023, 42(10): 49-67.

- [27] 马君, 郭明杰. 企业数字化转型、员工数字认知与创新绩效: 技术为刀, 我为鱼肉? [J]. 科技进步与对策, 2022(12): 1-11.
- [28] AUTIO E, NAMBISAN S, THOMAS L D, et al. Digital affordances, spatial affordances, and the genesis of entrepreneurial ecosystems[J]. Strategic Entrepreneurship Journal, 2018, 12(1): 72-95.
- [29] 张吉昌, 龙静. 数字化转型、动态能力与企业创新绩效——来自高新技术上市企业的经验证据[J]. 经济与管理, 2022, 36(3): 74-83.
- [30] 李春发, 李冬冬, 周驰. 数字经济驱动制造业转型升级的作用机理——基于产业链视角的分析[J]. 商业研究, 2020(2): 73-82.
- [31] 李宏兵, 张兵兵, 谷均怡. 本土市场规模与中国能源效率提升: 基于动态面板门槛效应的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 61-70.
- [32] GOLDFARB A, TUCKER C. Digital economics[J]. Journal of Economic Literature, 2019, 57(1): 3-43.
- [33] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.
- [34] 贺晓宇, 沈坤荣. 跨国并购促进了企业创新能力提升吗? ——基于制造业上市公司的微观证据[J]. 现代经济探讨, 2018(7): 78-86, 98.
- [35] FERREIRA J, FERNANDES C I, FERREIRA F. To be or not to be digital, that is the question: Firm innovation and performance[J]. Journal of Business Research, 2019, 101(8): 583-590.

How Digital Transformation Promotes Manufacturing Innovation

Ding Shihao¹, Li Ping²

- (1. School of Finance and Economics, Henan University of Technology, Jiaozuo 454003, China;
2. Institute of Quantitative Economics and Technological Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China)

Abstract: By selecting the panel data of China's manufacturing industry from 2005 to 2020, the two-way fixed effect model was used to examine the impact of digital transformation on innovation, and the intermediary effect model was used to examine its impact mechanism based on market, technology and product dimensions. The research results show that digital transformation has a significant innovation effect, and shows the dual heterogeneity of industry and investment. On the one hand, digital transformation inhibits innovation in labor resource intensive industries, but has a positive impact on innovation in capital technology intensive industries. On the other hand, hardware digital transformation has a stronger innovation effect than software digital transformation. Market scale effect, technology transformation effect and product innovation effect are the three major channels for digital transformation to promote manufacturing innovation. Among them, hardware digital transformation can lead to technology transformation and upgrading and product innovation and development to promote innovation, while software digital transformation can drive innovation through local market scale expansion and product innovation and development.

Keywords: digitalization; manufacturing; innovate