实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响

——基于大语言模型和专利文本的经验证据

杨亚平　刘　歆　刘心语

摘　要：提升产业链供应链韧性已成为维护国家经济安全和社会稳定的战略基石，但在制造业供应链安全风险持续攀升的背景下，关于实数技术融合如何切实增强制造业企业供应链韧性的研究仍相对缺乏。利用大语言模型对A股上市公司83万余条发明专利数据的摘要文本进行语义识别，构建企业实数技术融合水平的测度指标，并结合企业层面的供应链韧性数据，研究实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响。研究结果表明，实数技术融合能够显著提升制造业企业供应链韧性，并存在数字基础设施建设、气候物理风险、不确定性感知、所有制属性等异质性影响。实数技术融合主要通过增强信息联通、促进资源优化和强化风险防控三条路径增强制造业企业供应链韧性。

关键词：实数技术融合；供应链韧性；制造业企业

中图分类号：F425　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-7543(2026)09-0095-21

制造业供应链韧性和安全水平已成为国家现代化产业体系建设的重要战略支点。当前，世界百年未有之大变局加速演进，全球进入新的动荡变革期，制造业供应链的脆弱性问题日益凸显。一方面，地缘政治冲突加剧，国际环境不确定性上升，主要经济体宏观政策调整等不断冲击全球供应链的稳定性和安全性。尤其是以美国为首的西方国家，以供应链安全为由冲击国际分工秩序，通过供应链联盟、推行友岸外包等手段，企图重塑“去中国化”的制造业供应链[1]。另一方面，作为全球供应链的重要参与者，中国已进入由要素驱动转向创新驱动的高质量发展阶段，但制造业仍在高端装备、核心零部件等领域存在“卡脖子”问题，同时面临产能结构性过剩、要素成本上升等约束[2]，亟须通过增强供应链韧性畅通国内国际双循环。作为供应链的微观主体[3]，制造业企业亟须探索提升供应链韧性的有效路径，这既是应对复杂国际博弈的重要举措，又是实现高水平科技自立自强的必由之路。

新一轮科技革命和产业变革加速演变，推动实体经济和数字经济深度融合已成为高质量发展的必由之路[4]。不同于以数字技术单向赋能为特征的数实融合模式，实体经济和数字经济的技术深度融合（以下简称“实数技术融合”）更加突出实体经济的主体地位，强调企业基于自身发展需求和竞争压力，主动引入并整合人工智能、

基金项目：国家自然科学基金面上项目“中国对外直接投资企业的创新绩效研究：基于ESCP分析框架”(72273051)；广东省哲学社会科学规划项目“不确定冲击、供应链协作和制造业企业供应链韧性：基于实数技术融合视角”(GD25ST06)；暨南大学研究生拔尖创新人才项目“实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响”(2026CXB003)。

作者简介：杨亚平，暨南大学经济学院教授、博士生导师；刘歆（通信作者），暨南大学经济学院博士研究生；刘心语，暨南大学经济学院硕士研究生。

物联网和云计算等数字技术，对既有生产体系进行系统性重构。具体而言，实数技术融合是制造业企业以生产效率提升和价值链跃迁为目标，将数字技术深度嵌入机械制造、工艺流程、能源管理和物流调度等实体物理系统，通过“虚实映射”和“数据互通”推动生产要素配置方式及组织运行模式的内生变革。这一过程并非外生技术冲击的被动响应，而是企业基于战略导向的主动选择，体现为在数字基础设施建设、智能设备投资、数据要素开发利用等方面的持续投入和动态优化。在此过程中，数字技术不再是简单的工具性补充，而是被内化为企业生产体系的重要组成部分，与实体技术形成协同演化关系。由此，实数技术融合呈现技术集成性、决策数据化、虚实交互性与动态演进等特征，并以实体生产系统为核心载体，实现由局部自动化向跨系统智能协同的跃迁。尤其在提升供应链韧性方面，实数技术融合能够通过全域感知和敏捷响应，有效化解断链风险。例如，吉利汽车通过构建“工业互联网平台+数字孪生”体系，实现对上千家供应商库存和生产进度的实时可视化监控。当某地发生突发事件导致物流受阻时，系统能基于算法瞬间模拟出最优替代方案，自动调度其他区域的零部件资源，将供应链中断风险降至最低。由此可见，实数技术融合正成为推动制造业形成新质生产力、实现价值创造模式跃升、提升企业核心竞争力的关键驱动力。那么，实数技术融合能否有效提升制造业企业供应链韧性？其中的作用机制是什么？本文试图回答上述问题，并为实数技术融合提升制造业供应链韧性、实现国民经济循环畅通提供重要经验证据。

一、相关文献综述

与本文密切相关的文献可归纳为两类。第一类为关于实数技术融合的研究。现有文献主要围绕实数技术融合的基本内涵、经济环境效应、融合测度及实现路径展开探讨。在基本内涵方面，实数技术融合将数据作为新型生产要素[5]，这一融合过程本质上是实体经济和数字经济领域内各类技术相互补充、协同发展的动态演进。在微观企业层面，这一融合表现为数字技术不断被吸收并融入实体技术的创新过程。通过持续学习、创新、整合和协作等机制，企业的资源配置、创新能力、商业模式、业务流程、产品服务乃至整个商业生态逐步实现数字化转型[4,6]。在经济环境效应方面，现有研究主要从微观和宏观两个层面展开探索。一方面，实数技术融合通过扩大出口产品范围、提升柔性生产能力、拓展知识宽度、优化资源配置、缓解融资约束等途径，显著促进企业出口产品策略优化[7]、推动企业绿色创新[8]、提升企业全球价值链稳定性[9]，从而为企业高质量发展提供新动能[4]。另一方面，实数技术融合能够有效推进实体经济发展[10]、提高就业包容性[11]和提升绿色发展效率[12]，为经济社会发展注入新活力。在融合测度方面，学者们采用了多种方法。周密等运用专利共分类分析方法，从时间、产业、区域、网络四个维度测度实数产业融合水平[13]。张少华等通过编制数字经济再生产过程投入产出表，深入分析实数融合趋势和程度[14]。Liu 等[12]、史丹和孙光林[15]、杨继东等[16]采用熵值法和耦合评价模型，对区域实数融合水平进行量化评估。进一步地，黄先海和高亚兴基于专利引用信息，从微观视角测度企业的实数产业技术融合行为[4]。在实现路径方面，相关研究表明新型实体企业是推进实数融合的重要力量[17]。同时，智慧城市建设[18]、自由贸易试验区设立[19]、数据交易平台建设[20]等政策举措均能有效赋能实数融合走深向实。综上，关于实数技术融合的研究较为丰富，且实数技术融合在经济社会发展中的作用和成效愈加显著，已成为推动新质生产力发展的关键抓手。然而，现有研究主要关注实数技术融合的经济环境效应，而较少从供应链韧性视角进行分析。事实上，在当前全球经济不确定性和供应链风险事件频发的背

景下,进一步提升供应链韧性对于中国制造业企业迈向全球价值链中高端具有重要战略意义,也为突破西方国家技术封锁奠定坚实基础。

第二类为关于供应链韧性的研究。作为一个跨学科概念,“韧性”广泛存在于社会学、生态学、工程学、管理学、经济学等多个领域,其核心内涵是指系统在遭受外部冲击后恢复至初始均衡状态的能力[21]。具体到供应链领域,供应链韧性是指面对外部冲击时,供应链节点企业乃至整个供应链系统能够维持链条稳定、防止断链,并调整恢复至受冲击前的运行状态,甚至实现危机转化和供应链升级的动态能力,其核心维度包括抵抗力和恢复力[22-23]。回顾已有文献,对于影响企业供应链韧性的前置因素,可归纳为外部环境因素和企业自身因素两大类。从外部因素来看,全国统一大市场建设[24]、数字金融发展[25]、智能制造[2]、制度环境改善[26]以及供应链数字化建设[23]等,通过提升企业创新能力、缓解融资约束、优化内部控制水平和供应链布局等途径,显著增强了企业供应链韧性。从企业自身因素来看,数字化转型被证实是提升供应链韧性的关键驱动力[3,27-28]。具体而言,客户企业数字化通过提升供应链协同水平和缓解供应商要素约束,对供应商企业的 ESG 表现产生积极影响[29];下游企业数字化转型通过优化供需匹配、稳定供需关系、提高供应商创新能力三个层面增强产业链供应链韧性,进而牵引上游企业全要素生产率增长[30];企业数字化转型显著降低了供应链上下游集中度,推动供应链配置多元化[31]。综上,现有研究多从外部环境视角考察提升企业供应链韧性的因素,而在企业自身因素方面主要聚焦于数字化转型对供应链的溢出效应。事实上,作为数字技术突破性发展的典型特征,实数技术融合不仅是企业实现数字化转型的核心驱动力,还是推动技术层面协同创新的关键抓手。然而,现有文献尚未从企业内部实数技术融合视角探讨其对供应链韧性的影响。

与已有研究相比,本文的边际贡献如下:其一,在研究视角上,本文以企业内部实数技术融合为切入点,考察实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响,这不仅有效补充了制造业企业供应链韧性的影响因素研究,还扩展了实数技术融合的相关研究成果,为深入理解实数技术融合的战略价值提供了新的理论视角。其二,在研究方法上,本文利用大语言模型测算企业实数技术融合指标,这不仅显著提升了实数技术融合测度的精细度和可靠性,还为实数技术融合的实证研究提供了一条可复制、可推广的技术路径。其三,在研究内容上,本文将制造业企业供应链韧性分为抵抗力和恢复力两大维度,并发现实数技术融合主要通过增强信息联通、促进资源优化和强化风险防控三条路径提升制造业企业供应链韧性,且进一步考察了数字基础设施建设、气候物理风险、不确定性感知和所有制属性等因素所带来的异质性影响。相关结论不仅为推动实数融合高质量发展、构建更具韧性的现代制造业供应链体系、培育新质生产力提供了精准施策依据,还为中国应对全球供应链重构挑战、突破西方技术封锁提供了坚实的理论支撑和实践路径,具有重要的战略意义。

二、特征性事实与理论分析

(一)特征性事实

实数技术融合是实体经济与数字经济深度协同的新型发展范式,是微观主体通过数字技术嵌入生产流程、重构要素配置、创新商业模式,推动传统产业体系向数字化、网络化、智能化方向转型的系统性变革。不同制造业细分行业之间的实数技术融合水平差异显著。具体而言,电气机械及器材制造,计算机、通信和其他电子设备制造,汽车制造,专用设备制造等行业的实数技术融合水平相对较高。其中,计算机、通信和其他电子设备制造业的实数技术融合专利申请数量超过 800 件,而电气机械及器材制造业的实数技

术融合专利申请数量更是高达2 300余件,位居各行业前列。相反,农副食品加工业、食品制造业、纺织服装服饰业等行业的实数技术融合水平相对较低,其实数技术融合专利申请数量大多低于10件①。究其原因,实数技术融合水平较高的行业通常属于资本密集型或技术密集型,其在产品研发、工艺设计、智能制造、供应链协同等关键环节高度依赖信息技术和数字工具,以实现效率优化、精度控制、创新突破,因而具备较强的数字技术吸纳能力和转型动力。而实数技术融合水平偏低的行业多数为劳动密集型或传统加工型行业,仍以劳动力、原材料等传统要素投入为主导,生产模式相对固化,对技术升级的边际效益有限,缺乏足够的资源和激励机制来推动深层次的技术融合。

(二)理论分析

1.实数技术融合与制造业企业供应链韧性

作为现代制造业组织能力体系的核心组成部分,供应链韧性是指供应链节点企业乃至整个系统在遭遇外部冲击时,能够维持关键业务连续性、防止链条断裂,并在受扰动后迅速恢复常态,甚至实现结构优化和能力重塑的动态适应能力。供应链韧性通常包含两个既相互关联又相对独立的维度[23,29]:一是供应链抵抗力,即对外部冲击的承受和缓释能力;二是供应链恢复力,即在冲击之后的回弹、重构和优化能力。实数技术融合强调企业将数字技术嵌入和赋能实体生产技术的创新实践,其本质并非简单的数字化工具使用,而是在数字技术和物理技术深度耦合基础上,生成新的生产方式、运营流程和组织能力。制造业企业主要通过三类途径实现这一融合:其一,在设备层面,通过将传感器、边缘计算、机器视觉等模块嵌入生产装备,实现设备健康管理、故障预测和能耗优化;其二,在流程层面,通过构建数字孪生、实时数据驱动的流程仿真和柔性调度系统,提升工艺优化和风险预警能力;其三,在系统层面,通过将ERP(企业资源计划)、MES(制造执行系统)、PLM(产品生命周期管理)等系统与供应链上下游平台深度集成,构建跨组织的智能协同体系。基于上述路径,实数技术融合从抵抗力和恢复力两方面促进供应链韧性的整体提升。

在供应链抵抗力层面,数字技术嵌入实体生产流程,使企业能够实现生产和供应链全流程的可视化、可度量、可预测,显著降低信息不对称和响应滞后[29]。物联网、云计算和智能传感的结合,使企业得以实时掌握供应商交付进度、关键原材料库存、生产节奏和设备状态,从而提升对供需错配、物流中断等潜在风险的识别和预判能力。同时,以数字孪生和柔性制造为基础的资源配置方式,使企业能够迅速调整生产方案、优化供应商结构并重构物流路径,从而在冲击情境下保持运营稳定性,提高供应链的抗冲击能力[7]。在供应链恢复力层面,实数技术融合通过强化协同响应和动态重构能力显著提升供应链的回弹水平。数字孪生、智能调度和实时优化算法能够在冲击发生后快速生成替代方案,提升恢复过程的自动化和智能化程度。与此同时,融合技术促进了供应链节点之间的数据共享、状态同步和协同决策,有效缩短了信息传递和协调调整的时滞,加快供应链由紊乱向稳态的恢复过程[30]。依托仿真模拟与实时反馈方式,企业在恢复过程中不仅能够迅速识别瓶颈节点和资源配置偏差,还能推动流程再造和结构升级,实现由“恢复性反弹”向“进化式提升”的跃迁。据此,本文提出如下研究假说:

假说1:实数技术融合能够显著提升制造业企业供应链韧性。

2.实数技术融合对制造业企业供应链韧性影响的作用机制

在供应链运行过程中,信息获取、资源配置与风险管理构成影响系统抵抗力和恢复力的关键环节。随着数字技术向实体经济深度渗透,实

①数据来源:根据各行业历年实数技术融合专利申请数量进行年度累加而得。

数技术融合通过重塑供应链的信息结构、资源配置方式和风险治理模式,系统性地提升了制造业企业应对不确定性冲击的能力。基于此,本文认为实数技术融合主要通过增强信息联通、促进资源优化和强化风险防控三条路径提升制造业企业供应链韧性。

实数技术融合能够通过增强信息联通提升制造业企业供应链韧性。信息经济学认为,当交易主体之间存在信息不对称时,逆向选择和道德风险将扭曲市场主体的决策行为[32],并降低系统运行效率。在传统制造业供应链中,上下游企业在需求变化、库存水平和生产进度等关键信息方面普遍存在信息不对称问题,企业往往基于不完全信息作出生产和采购决策,需求预测误差在供应链中逐级放大,从而加剧供应链波动并提高中断风险。实数技术融合通过将数字技术嵌入实体生产和供应链管理环节,提升了信息的可获得性、透明度和可验证性,有助于缓解供应链节点之间的信息不对称。一方面,实数技术融合推动企业整合从终端市场到原材料供应环节的多源数据,实现供应链信息的实时共享和系统分析,提高需求信息的透明度和准确性,使预测结果更加稳健,并通过“以信息替代库存”的方式优化库存管理,促进供需匹配和动态平衡,从而降低断链风险并提升供应链的灵活性和响应速度[3,30]。另一方面,实数技术融合降低了企业获取交易对手信用记录、历史履约表现和市场评价等信息的成本,有助于企业在供应商选择和合作对象筛选过程中缓解逆向选择问题,降低信息搜寻成本和转换成本,推动供应链关系由短期交易向稳定合作转变[23]。随着信息联通水平的提升,供应链节点之间的可观察性和可监督性不断增强,信息隐匿和机会主义行为的发生空间被压缩,协同决策中的协调成本和履约不确定性随之下降,企业在生产安排、交付节奏和风险分担等方面能够形成更加稳定的预期和合作关系,从而增强其在外部冲击下维持连续运转并实现快速调整的能力。

实数技术融合能够通过优化资源配置提升制造业企业供应链韧性。资源配置理论认为,在要素稀缺约束下,经济系统的运行效率取决于资源在不同主体和用途之间的配置效率,资源错配不仅会抑制生产效率[33],还会削弱系统在外部冲击下的调整能力和恢复能力。在传统制造业供应链中,受制于信息滞后、计划刚性和协同不足等因素,劳动、资本、库存和物流运力等关键资源的配置往往呈现静态特征,难以及时响应需求波动和供给冲击,进而放大不确定性对供应链稳定运行的负面影响。实数技术融合通过强化数据要素在资源配置中的基础性作用,推动资源配置方式由经验驱动向数据驱动转变,有助于缓解供应链运行中的结构性错配。一方面,实数技术融合能够提升企业对劳动投入、资本使用、库存状况和物流运转等关键资源的实时感知能力,使企业能够基于动态数据对人员配置、资金投向、库存水平和运输路径进行灵活调整,提高资源配置的匹配度和使用效率,从而降低资源冗余和瓶颈约束对供应链韧性的冲击[7,34]。另一方面,实数技术融合降低了资源重新配置过程中的信息成本和协调成本,增强了企业在多供应商、多生产节点和多物流路径之间进行资源切换与组合的能力,推动供应链由单一依赖向多节点、多路径配置转变,提高系统整体的弹性和冗余度[31]。随着资源配置效率的提升,供应链系统在面对外部冲击时能够更多依赖内部调整而非被动中断来吸收不确定性冲击。企业在生产恢复、交付保障和结构调整等方面的响应能力显著增强,从而提升制造业企业供应链韧性。

实数技术融合能够通过强化风险防控提升制造业企业供应链韧性。不确定性与风险管理理论认为,在高度不确定的环境下,经济主体面临的核心挑战在于对潜在风险的识别、评估和应对能力,不确定性冲击会加剧系统运行的波动性和脆弱性[35]。在传统制造业供应链中,需求波动、供给中断、物流受阻和价格剧烈变动等风险通常

具有突发性、传导性特征，企业受限于信息获取和分析能力，难以及时识别风险信号并作出前瞻性调整，风险防控更多依赖事后应对和被动修复，从而削弱了供应链系统对外部冲击的吸收和恢复能力。实数技术融合通过提升风险识别、预警和应对的技术基础，推动供应链风险防控模式由事后应对向事前预警和事中处置转变。一方面，实数技术融合依托大数据、物联网和智能感知等技术手段，实现对供应、生产、物流等关键环节运行状态的持续监测，使企业能够及时捕捉潜在风险信号，提前识别供应中断、交付延迟和需求异常等风险隐患，从而降低风险暴露的突发性和扩散性[36]。另一方面，基于数据分析和智能算法的风险评估与情景模拟工具，有助于企业对不同风险冲击进行量化分析和压力测试，优化应急预案和资源调配方案，提高风险应对决策的针对性和有效性，减少不确定性冲击对供应链稳定运行的扰动。此外，实数技术融合通过提高供应链运行的透明度和可追溯性，缓解了企业与金融机构之间的信息不对称，有助于金融机构更加准确地评估企业及其上下游主体的信用风险，从而为供应链主体提供更具针对性的金融支持，降低企业外部融资成本并拓宽融资渠道[3]。随着风险防控能力的提升，供应链系统对外部冲击的感知与响应更加及时和精准，风险传导链条得到有效抑制。企业在面对突发性冲击时能够通过主动调整而非被动停滞来维持关键业务连续性，并在冲击后实现更快恢复和结构优化，从而显著增强制造业企业供应链韧性。

基于以上分析，本文提出如下研究假说：

假说2：实数技术融合能够通过增强信息联通、促进资源优化和强化风险防控提升制造业企业供应链韧性。

三、研究设计

（一）计量模型设定

为研究实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响，本文构建如下计量模型：

$$SCR_{it}=\alpha_1+\theta_1 lnDRI_{it}+\sum\beta_1 X_{ihct}+\varphi_h+\mu_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，i 表示企业，c 表示城市，h 表示行业，t 表示年份，SCR_{it} 表示制造业企业供应链韧性，$lnDRI_{it}$ 反映企业实数技术融合水平，X_{ihct} 为控制变量的集合，φ_h 和 μ_t 分别为行业固定效应和年份固定效应，ε_{it} 为随机扰动项。

（二）变量说明

1.被解释变量

为准确刻画企业供应链韧性，现有研究通常利用综合性指数进行度量[3,23]，但这类指数难以区分供应链韧性的不同维度及其具体来源。因此，本文借鉴许民利等[37]的研究思路，从供应链抵抗力和供应链恢复力两个维度分别量化供应链韧性。

（1）供应链抵抗力（$SCR1$）。供应链抵抗力是指供应链系统在面对外部冲击或突发事件时，维持正常运作、缓解冲击影响并降低中断风险的能力[3]。当企业面临原材料供应受阻、物流运输中断、市场需求波动等外部冲击时，供应链抵抗力较强的企业通常能够通过增加库存储备、替换供应商、调整采购策略、优化生产计划等方式缓解冲击影响，维持生产活动的正常运转；而供应链抵抗力较弱的企业则更容易出现生产停滞、设备闲置和产能利用不足等问题。由此可见，企业在冲击期间维持既定产出水平的能力能够在一定程度上反映其供应链抵御外部风险的能力。基于此，本文采用企业产能利用率衡量供应链抵抗力。参考李雪松等[38]的研究，采用随机前沿生产函数方法构建企业产能前沿面，并基于主营业务收入、总资产和员工人数等关键投入产出指标测算企业产能利用率。具体而言，通过计算企业实际产出与技术前沿产出的比值衡量产能利用水平。产能利用率越高，企业越能在外部冲击下保持生产经营活动的连续性和稳定性，其供应链抵抗力越强。

（2）供应链恢复力（$SCR2$）。供应链恢复力是

指供应链在遭受外部冲击导致运行状态偏离正常水平后，通过资源重组、流程调整和协同优化等方式恢复正常运作，或建立新的稳定运行状态的能力。与供应链抵抗力强调冲击发生时的风险抵御能力不同，供应链恢复力更关注冲击发生后的响应效率和恢复速度，体现企业在资源配置、运营管理和供应链协同等方面的动态调整能力。恢复力越强，意味着企业能够更快缓解供需失衡、库存积压、物流受阻等问题，从而缩短供应链恢复周期，降低冲击造成的持续性损失。本文借鉴邓慧慧等[39]利用存货周转率衡量供应链韧性的研究思路，并考虑到存货周转率能够反映企业存货流转效率、资源配置能力以及供需匹配水平，因而将其作为供应链恢复力的代理变量。具体而言，存货周转率采用营业成本与平均存货余额的比值进行衡量。较高的存货周转率意味着企业能够更快实现存货消化和补充，提高供应链响应速度和运营效率，在受到外部冲击后更快恢复正常生产经营活动，从而体现更强的供应链恢复能力。

2.核心解释变量

实数技术融合（*lnDRI*）。本文基于大语言模型，识别专利摘要文本中包含的数字技术情况，以此测度制造业企业的实数技术融合水平。具体而言，本文首先依据国家知识产权局办公室发布的《数字经济核心产业分类与国际专利分类参照关系表（2023）》，将 IPC 主分类号不属于数字经济核心产业的专利界定为传统实体技术专利。在此基础上，为识别这些实体专利是否融合了数字技术，本文引入大语言模型对专利文本进行深入解析和识别。

在界定数字技术范畴时，本文围绕人工智能、云计算、大数据、物联网、区块链、通信网络六大领域搭建数字技术识别框架。为提升识别精度，本文在已有研究基础上扩充关键词库，并结合《关键数字技术专利分类体系（2023）》《企业数字化转型白皮书（2021 版）》《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》《通信网络 2030》等资料，构建系统化的数字技术关键词词典①。

既有研究常采用基于关键词的词典法识别专利文本中的数字技术，但该方法存在词典完备性不足、语义歧义识别较弱、否定语境判断能力有限等问题[40]。例如，传统方法可能将以下摘要误判为通信技术相关："产品合格率提高约 3%，强度指标提高了 0.4GPa"，仅因"4G"字样误导。而大语言模型能够结合上下文语义，准确判断该描述属于材料工程领域，从而有效避免误判。又如，在"本发明提供一种基于传感器的温度控制方法"的专利描述中，尽管包含"传感器"关键词，但其仅用于设备控制，模型能够据此避免误判。鉴于此，本文引入由阿里云研发、基于 Transformer 架构的 Qwen2.5-7B 大语言模型，以实现对专利文本的深度语义识别。该模型具备较强的中文语义理解和推理能力，能够识别上下文中的否定表达、概念漂移和语义双关，显著提升识别的准确性和稳健性。

在具体操作方面，本文在构建训练数据集时遵循"规模充足、分布平衡、代表性强"的原则。首先，从 IncoPat 数据库中对专利摘要进行初步语义预筛选，筛除与数字技术和实体技术均无关的噪声文本，以提高训练数据的信息密度。在此基础上，从预筛选后的候选集中随机抽取样本，并邀请具备技术背景的研究人员进行双人交叉标注，最终形成 582 条正样本和 418 条负样本构成的训练集，共计 1 000 条②。

在模型训练方面，本文按照 80%训练集、20%验证集的标准划分方法，对模型性能分别从准确率（Accuracy）、精确率（Precision）、召回率（Recall）和 F1 分数四个维度进行系统评估，确

①限于篇幅，留存备索。

②需要说明的是，在样本抽取过程中，本文在随机抽样的基础上对正负样本比例进行了适度控制，以避免类别分布过度失衡对模型训练产生影响。最终形成的训练集在正负样本之间保持相对均衡，但不影响样本的随机性和代表性。

保模型识别效果稳健可靠。微调后的 Qwen2.5-7B 大语言模型在验证集上表现优异且稳健，其中 Accuracy 为 90.4%，Precision 和 Recall 均达到 91.4%，F1 分数为 91.4%，各项指标均处于较高水平，显著优于传统基于词典匹配的方法，能够更准确地识别实数技术融合专利，为本文核心指标的构建提供了可靠支撑①。

基于训练完成的 Qwen2.5-7B 大语言模型，本文对所有实体技术专利进行语义识别和二分类判断。若模型识别该专利融合了六大类数字技术中的任一项，则将其归类为“实数技术融合”专利。按企业—年份维度对实数技术融合专利数量进行汇总，并将该值加 1 后取自然对数，构建出企业层面的实数技术融合水平指标②。

3.控制变量

为克服遗漏变量的影响，本文借鉴黄先海和高亚兴[4]、苏桔芳等[25]的研究，选取了资产负债率、总资产收益率、股权集中度、董事规模、无形资产占比、企业规模、两职合一、行业集中度、经济发展、财政科技支出、产业结构、金融发展等控制变量。

具体变量定义及其描述性统计结果见表 1（下页）。整体来看，制造业企业的供应链韧性在样本中呈现显著差异。其中，供应链抵抗力（*SCR*1）的取值范围为 0.612 至 0.855，供应链恢复力（*SCR*2）的取值范围为 0.484 至 21.371，表明不同企业在抵御外部冲击和恢复正常运营的能力方面存在较大差异。实数技术融合水平（*lnDRI*）的均值为 0.096，最小值为 0，最大值为 1.946，这说明一方面制造业企业中仍有相当一部分尚未开展实数技术融合，另一方面整体融合水平仍处于较低阶段。其余控制变量的统计特征与既有文献保持一致，为本文的实证分析提供了良好的数据基础。

（三）样本选取和数据来源

鉴于数字技术的快速发展及其规模化应用主要始于 2010 年后，同时考虑到数据可得性，本文将 2011—2022 年中国 A 股制造业上市公司作为研究样本，并剔除 ST、*ST、PT 类企业、暂停上市企业以及数据严重缺失的企业，同时对所有连续变量进行双边 1%缩尾处理，最终得到 17 195 个企业—年度观测值。本文相关数据主要来自历年《中国城市统计年鉴》、IncoPat 全球专利数据库、国泰安数据库和中国研究数据服务平台。

四、实证结果分析

（一）基准回归结果

表 2 展示了实数技术融合对制造业企业供应链韧性的基准回归结果。其中，列（1）和列（3）控制年份固定效应和行业固定效应，仅纳入核心解释变量实数技术融合（*lnDRI*）；列（2）和列（4）在此基础上进一步加入一系列控制变量。结果显示，*lnDRI* 的回归系数均显著为正，说明实数技术融合能够显著增强制造业企业供应链抵抗力和恢复力，从而验证了假说 1。

（二）内生性处理

鉴于制造业节点企业供应链韧性的提升难以完全依靠传统运营模式，韧性水平较高或面临较强外部冲击的企业往往更有动机主动推进实数技术融合，借助数字技术手段重构供应链管理流程和协同机制。由此，实数技术融合与制造业企业供应链韧性之间可能存在反向因果关系，从而导致基准回归结果产生内生性偏误。为有效缓解上述问题，本文采用工具变量法，并通过两阶段最小二乘法（2SLS）进行估计。具体而言，本文参考杨亚平等[41]的做法，结合样本数据的异方差特征构造工具变量（*IV*）。本文首先计算企业

①关于训练样本构建、标注规则、标注人员背景、一致性检验及判断指令等细节，留存备索。

②需要说明的是，考虑到发明专利在技术创新性、审查严格性及知识含量方面显著高于实用新型和外观设计专利，能够更为准确地刻画企业的核心技术能力和技术融合水平，本文在构建实数技术融合指标时仅保留发明专利。

表 1 变量定义与描述性统计结果

变量	变量符号	变量说明	样本	均值	标准差	最小值	最大值
供应链抵抗力	*SCR*1	基于随机前沿生产函数法,计算实际产出与前沿产出之比	17 195	0.756	0.045	0.612	0.855
供应链恢复力	*SCR*2	营业成本/平均存货余额	17 195	4.455	3.645	0.484	21.371
实数技术融合	*lnDRI*	*ln*(1+实数技术融合专利申请数量)	17 195	0.096	0.332	0	1.946
资产负债率	*LEV*	总负债/总资产	17 195	0.388	0.188	0.054	0.840
总资产收益率	*ROA*	净利润/总资产	17 195	0.043	0.061	–0.207	0.206
股权集中度	*TOP*1	第一大股东持股比例	17 195	33.256	14.098	8.730	71.450
董事规模	*lnBOARD*	*ln*(董事会人数)	17 195	2.109	0.189	1.609	2.565
无形资产占比	*IA*	无形资产/总资产	17 195	0.044	0.032	0.002	0.191
企业规模	*lnSIZE*	*ln*(总资产)	17 195	22.102	1.163	20.065	25.707
两职合一	*DUAL*	若董事长与总经理是同一人,则赋值为 1,否则为 0	17 195	0.322	0.467	0	1
行业集中度	*HHI*	$HHI=\sum_{i=1}^{n}(\frac{S_i}{S})^2$。其中,$S_i$ 表示企业营业收入,S 表示企业所属行业的营业收入合计	17 195	0.163	0.115	0.041	0.672
经济发展	*lnPGDP*	*ln*(人均地区生产总值)	17 195	11.457	0.507	10.048	12.198
财政科技支出	*TECH*	科学技术支出/财政一般预算支出	17 195	0.043	0.027	0.003	0.130
产业结构	*IS*	第三产业增加值/第二产业增加值	17 195	1.529	0.961	0.438	5.284
金融发展	*FIN*	金融机构贷款余额/地区生产总值	17 195	1.652	0.684	0.442	3.569

实数技术融合水平相对于其所在行业—省份均值的偏离程度,并在此基础上引入非线性变换以放大该偏离所蕴含的有效变异信息;进一步地,将该偏离项的三次方与全国层面互联网发展水平(以互联网增长率衡量)相乘,构造工具变量。

该工具变量在相关性和外生性方面具有合理依据。一方面,企业相对于行业—地区平均水平的偏离程度反映其在技术分布中的相对位置,结合全国层面的互联网发展趋势所形成的外生技术冲击,将显著影响企业推进实数技术融合的激励和能力,从而满足相关性要求;另一方面,全国层面的互联网发展主要由宏观技术进步和基础设施建设驱动,难以受到单个企业供应链韧性的反向影响。此外,本文在回归中控制行业固定效应和年份固定效应,从而有效吸收行业层面与宏观时间趋势的共同冲击,削弱行业—省份均值可能带来的直接影响。因此,该工具变量在合理控制条件下可视为外生。

表 3(下页)列(1)—(3)汇报了工具变量法的回归结果。从 Kleibergen-Paap rk LM 检验和 Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量来看,工具变量显著拒绝欠识别假设,且不存在弱工具变量问题,表明相关性假设得到充分支持。在第二阶段回归中,列(2)和列(3)*lnDRI* 的回归系数显著为正,说明在有效控制反向因果关系和潜在遗漏变量干扰后,实数技术融合依然能够显著增强制造业企业供应链抵抗力和恢复力。

此外,为进一步检验遗漏变量偏误对研究结论的影响,本文借鉴孙伟增等[42]的研究,采用两种方式进行分析。第一种方式是,在设定遗漏变量与因变量相关性和可观测变量与因变量相关性的比值 δ=1,以及包含全部可观测和不可观测因素模型的最大拟合优度 R_{max} 后,计算校正后

表 2 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	*SCR*1	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*2
lnDRI	0.006***	0.004***	0.674***	0.360**
	(0.002)	(0.001)	(0.167)	(0.156)
LEV		0.082***		2.023***
		(0.005)		(0.401)
ROA		0.284***		6.019***
		(0.010)		(0.752)
*TOP*1		0.000***		0.014***
		(0.000)		(0.005)
lnBOARD		0.004		0.245
		(0.003)		(0.291)
IA		−0.070***		−0.221
		(0.021)		(1.724)
lnSIZE		−0.007***		0.165**
		(0.001)		(0.074)
DUAL		−0.005***		−0.213*
		(0.001)		(0.112)
HHI		0.009		0.496
		(0.006)		(0.519)
lnPGDP		0.007***		0.338*
		(0.002)		(0.198)
TECH		0.071**		3.789
		(0.032)		(3.198)
IS		0.002**		−0.124*
		(0.001)		(0.071)
FIN		−0.003**		−0.159
		(0.001)		(0.115)
常数项	0.756***	0.780***	4.391***	−4.833*
	(0.001)	(0.030)	(0.064)	(2.598)
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
N	17 195	17 195	17 195	17 195
Adj-R^2	0.145	0.295	0.194	0.223

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10%水平上显著,括号内为聚类到企业层面的稳健标准误。以下各表同。

的系数估计值 β_1^*。若 β_1^* 位于基准回归系数 95%

表 3 工具变量法回归结果

	(1)	(2)	(3)
	lnDRI	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI		0.004*	0.363**
		(0.002)	(0.159)
IV	0.032***		
	(0.002)		
控制变量	是	是	是
Kleibergen-Paap rk LM 值	90.122 [0.000]		
Kleibergen-Paap rk Wald F 值	333.616 {16.38}		
年份固定效应	是	是	是
行业固定效应	是	是	是
N	16 437	16 437	16 437
Adj-R^2		0.175	0.038

注:[]内数值为相应统计量的 P 值,{}内数值为 Stock-Yogo 检验 10%水平上的临界值。由于互联网增长率数据在 2011年存在缺失,故样本量有所减少。

的置信区间内,则说明即使考虑不可观测因素的影响,核心结论依然成立。第二种方式是,在给定 R_{max} 并假设核心解释变量真实效应为零(β_1=0)的条件下,反向计算 δ 值。若 δ 的绝对值大于 1,则意味着不可观测变量需要具有比已观测变量更强的选择性才能使估计结果失效,表明遗漏变量偏误不足以推翻现有结论;反之,则表明研究结论可能受到遗漏变量的影响。结果表明,无论采用何种检验方法,相关统计量均满足判别标准①,表明即使存在不可观测遗漏变量,其对估计结果的影响也较为有限,实数技术融合促进制造业企业供应链韧性的研究结论依然稳健。

(三)稳健性检验

1.指标有效性检验

第一,为检验本文构建的实数技术融合指标能否有效刻画制造业企业实数技术融合水平的空间差异,本文从描述性分布角度进行初步验证。具体而言,将样本期内各城市制造业企业申

①限于篇幅,留存备索。

表 4 指标有效性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
DRI_WEIGHT	0.003*	0.609***		
	(0.001)	(0.214)		
*lnDRI*1			0.002*	0.051
			(0.001)	(0.092)
控制变量	是	是	是	是
常数项	1.117***	14.234***	0.779***	-5.164**
	(0.050)	(3.648)	(0.030)	(2.610)
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	否	否	是	是
企业固定效应	是	是	否	否
N	16 910	16 910	17 195	17 195
Adj-R^2	0.755	0.792	0.294	0.222

注:列(1)—(2)改为控制企业固定效应,以缓解企业层面不可观测特征导致的遗漏变量偏误。

请的实数技术融合专利数量进行跨年度加总,并比较不同城市之间的相对水平。结果显示,深圳、北京、上海、杭州等数字经济发展水平较高、创新资源集聚程度较强的城市,其制造业企业实数技术融合专利申请规模显著高于其他地区,呈现明显的空间集聚特征。该分布格局与中国实数融合的现实发展态势高度一致,表明本文所构建的实数技术融合指标具有较强的外部一致性和现实解释力。

第二,本文从企业层面引入多项与实数技术融合相关的替代性指标进行交叉验证,包括企业年度发明专利申请总量、研发人员数量、研发投入金额等,并将其与 *lnDRI* 进行相关性分析。结果显示,*lnDRI* 与上述指标均呈显著正相关关系①,说明基于大语言模型构建的实数技术融合指标,能够较好地反映制造业企业在技术创新投入和数字技术应用方面的综合水平,从而验证了指标的有效性。

第三,考虑到实数技术融合不仅体现为专利数量,还体现为技术质量和融合深度,本文进一步基于专利被引证次数对实数技术融合指标进行加权处理。专利被引证次数能够较好地反映其技术价值和市场认可度,被引证次数越高,通常意味着专利质量越高、技术融合程度越深。因此,本文以被引证次数作为质量权重,对识别出的实数技术融合专利进行加权。鉴于不同申请年份的专利在被引证次数上存在系统性差异(早期专利更易获得较多引用),本文对被引证次数进行年度标准化处理。具体而言,按照专利申请年份分组,采用极差标准化方法将被引证次数归一化至[0,1]区间;对于当年被引证次数无差异的情形,则统一赋值为 0,以避免分母为 0 所带来的计算偏误。在此基础上,将标准化后的被引证次数作为权重,与实数技术融合专利标识相结合,并在企业—年度层面进行加总,得到实数技术融合质量指数(*DRI_WEIGHT*)。回归结果如表 4 列(1)—(2)所示,*DRI_WEIGHT* 的回归系数均显著为正,说明纳入质量权重后,实数技术融合对制造业企业供应链韧性的促进作用并非仅来源于数量扩张,更体现为高质量技术融合所带来的实质性提升。

第四,为进一步检验本文基于大语言模型构建的实数技术融合指标的稳健性,本文参照黄先

①限于篇幅,留存备索。

海和高亚兴[4]的研究方法，采用传统文本分析思路重新构造实数技术融合指标（*lnDRI*1），并进行对比回归分析。回归结果见表4列（3）—（4）所示，列（3）*lnDRI*1的回归系数显著为正，表明传统测度方法能够识别出实数技术融合对制造业企业供应链抵抗力的促进作用；而列（4）*lnDRI*1的回归系数不显著，说明其难以有效捕捉实数技术融合对供应链恢复力的影响效应。该结果表明，传统文本分析方法在识别企业冲击后调整、修复与重构等更具隐含性和过程性的能力维度方面存在明显局限。相比之下，依托大语言模型的深度语义解析能力，本文构建的实数技术融合指标能够更准确地识别企业在技术融合过程中所体现的动态调整能力和系统韧性特征，从而显著提升了指标测度的精细度和样本数据的有效性。

2.调整聚类标准误

考虑到制造业内部各细分行业之间可能存在的序列相关性，本文进一步将聚类标准误由企业层面调整为行业层面。回归结果如表5列（1）和列（2）所示，*lnDRI*的回归系数均显著为正，说明实数技术融合对制造业企业供应链韧性的促进作用依然成立。

3.滞后效应

鉴于实数技术融合对制造业企业供应链韧性的提升效应可能存在时滞，本文将实数技术融合滞后一期（*l.lnDRI*）重新进行回归。回归结果如表5列（3）和列（4）所示，*lnDRI*的回归系数均显著为正，表明实数技术融合在滞后一期后仍然能够显著提升制造业企业供应链抵抗力和恢复力，说明本文研究结论并非短期扰动所致。

4.排除其他政策干扰

在样本期内，多项相关政策的实施可能对制造业企业供应链韧性产生潜在影响，从而干扰对实数技术融合效应的识别。为此，本文重点控制以下两类政策因素：一是“宽带中国”试点政策，该政策通过加强数字基础设施建设，形成技术互补和协同，进而提升供应链韧性[43]；二是服务贸易创新发展试点政策，该政策通过促进实质性创新、优化制度环境以及强化区域集聚效应，对企业供应链韧性产生积极影响[44]。本文将上述政策对应的虚拟变量分别纳入基准回归模型进行重新估计，回归结果如表5列（5）和列（6）所示，*lnDRI*的回归系数均显著为正，说明在控制其他重要政策冲击后，实数技术融合对制造业企业供

表5 稳健性检验回归结果

	（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI	0.004***	0.360***			0.004***	0.360**
	（0.001）	（0.032）			（0.001）	（0.156）
l.lnDRI			0.005***	0.343**		
			（0.002）	（0.160）		
控制变量	是	是	是	是	是	是
常数项	0.780***	−4.833***	0.781***	−5.739**	0.776***	−4.987*
	（0.022）	（0.529）	（0.032）	（2.800）	（0.030）	（2.608）
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是
N	17 195	17 195	13 854	13 854	17 195	17 195
Adj−R^2	0.295	0.223	0.291	0.228	0.295	0.223

注：列（1）和列（2）括号内为聚类到行业层面的稳健标准误；由于将实数技术融合滞后一期，因而列（3）和列（4）样本量有所减少。

应链抵抗力和恢复力的正向影响依然显著,进一步验证了本文结论的稳健性。

五、作用机制检验

前文的实证结果已验证实数技术融合对制造业企业供应链韧性具有显著促进作用。为进一步揭示其内在作用机理,本文基于江艇[45]提出的因果中介效应检验框架,对实数技术融合影响制造业企业供应链韧性的传导路径进行检验。结合前述理论分析,本文认为实数技术融合主要通过增强信息联通、促进资源优化和强化风险防控三条机制路径提升制造业企业供应链韧性。

(一)信息联通机制检验

考虑到信息联通既体现在企业与外部市场之间的信息透明度,也反映在企业内部对数字技术的信息处理和整合能力上,本文从信息不对称程度和数字技术应用能力两个维度展开机制检验。一方面,借鉴宋敏等[46]的研究,本文选取流动性比率、非流动性比率以及反转指标,提取其第一主成分构建信息不对称代理变量(*ASY*)。该指标数值越大,表明企业面临的信息不对称程度越高。另一方面,参考金星晔等[40]的做法,基于企业年报文本提取数字化相关词汇的出现频率并取对数,构造企业数字技术应用水平指标(*lnDIG*),用于衡量企业的信息处理能力和数字化程度。回归结果如表6列(1)—(2)所示。其中,列(1)*lnDRI*的回归系数显著为负,表明实数技术融合能够显著降低企业面临的信息不对称程度;列(2)*lnDRI*的回归系数显著为正,说明实数技术融合显著提升了企业对数字技术的应用能力和信息处理水平。因此,实数技术融合一方面通过改善信息透明度、缓解信息不对称,另一方面通过强化企业对数字化信息的获取、整合和分析能力,显著增强了供应链运行过程中的信息联通性,从而为提升制造业企业供应链韧性提供了重要支撑。

(二)资源优化机制检验

在供应链运行过程中,生产要素能否在不同环节和主体之间实现高效流动和合理配置,是决定系统运行效率和冲击应对能力的重要基础。资源配置偏离最优状态,不仅会降低企业生产效率,还会削弱供应链系统在外部冲击下的调整和恢复能力。基于此,本文从资本配置效率和劳动配置效率两个维度对资源优化机制进行检验。一方面,借鉴倪婷婷和王跃堂[47]的研究,采用改良后的期望投资模型测算企业资本配置偏离指标(*OVERI*),即企业实际投资水平偏离合理投资水平的程度。该指标数值越大,表明资本配置偏

表6 机制检验回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	信息联通机制		资源优化机制		风险防控机制	
	ASY	*lnDIG*	*OVERI*	*LIE*	*IC*	*FC*
lnDRI	−0.047*	0.294***	−0.032***	−0.013**	13.775***	−0.004***
	(0.027)	(0.042)	(0.007)	(0.006)	(2.780)	(0.001)
控制变量	是	是	是	是	是	是
常数项	5.623***	−1.051**	−0.477***	−0.172**	125.982**	0.012
	(0.263)	(0.474)	(0.144)	(0.079)	(51.790)	(0.017)
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是
N	17 195	17 195	15 167	17 195	16 900	17 195
Adj-R2	0.557	0.398	0.021	0.069	0.183	0.349

注:由于资本配置效率指标和内部控制指数存在缺失值,因而列(3)和列(5)样本量有所减少。

离程度越高、资本配置效率越低。另一方面，借鉴倪婷婷和王跃堂[47]的研究，采用单位雇用人数变动率实际值与预期值之差的绝对值衡量劳动配置效率（*LIE*）。该指标数值越大，表明企业劳动资源错配程度越高、劳动配置效率越低。回归结果如表6列（3）—（4）所示，*lnDRI*的回归系数均显著为负，表明实数技术融合能够显著降低企业资本配置偏离程度和劳动资源错配程度，提高资本配置效率和劳动配置效率。因此，实数技术融合通过提升资本配置效率和劳动配置效率，促进供应链资源优化配置，增强企业应对需求波动和供给冲击的动态调整能力，从而提升制造业企业供应链韧性。

（三）风险防控机制检验

风险防控能力是企业在不确定环境中维持供应链稳定运行的重要保障，其核心在于通过完善内部治理和外部风险分担机制，降低经营波动和冲击传导的放大效应。基于此，本文从内部控制水平和融资成本两个维度对风险防控机制进行机制检验。一方面，借鉴张树山和谷城[23]的研究，本文采用迪博内部控制与风险管理数据库中的企业内部控制指数（*IC*）来衡量企业内部控制和风险管理水平。该指标数值越高，表明企业内部风险识别、防范和应对能力越强。另一方面，参考王梓琪和周国富[3]的做法，本文以企业财务费用与总负债之比构造融资成本指标（*FC*），用于衡量企业在外部融资过程中面临的资金约束和风险溢价水平。回归结果如表6列（5）—（6）所示。其中，列（5）*lnDRI*的回归系数显著为正，表明实数技术融合显著提升了企业内部控制水平，有助于强化企业对经营风险和供应链风险的识别、防范与应对能力；列（6）*lnDRI*的回归系数显著为负，说明实数技术融合能够有效降低企业融资成本，缓解外部融资约束，增强企业在冲击情境下获取流动性支持和风险缓冲资源的能力。总之，实数技术融合通过改善企业内部风险治理结构并优化外部风险分担条件，显著提升了制造业企业供应链的风险防控能力，从而为供应链韧性的形成和强化提供了重要保障。综上，本文的假说2得到验证。

六、异质性分析

（一）数字基础设施建设

数字基础设施是数字技术发挥生产性作用的重要载体，其完善程度直接影响企业获取、传输和处理数据要素的能力，并决定数字技术在生产运营和供应链协同中的应用深度及效率[43]。基于此，本文借鉴钞小静等[43]的研究，采用各城市4G基站数量衡量数字基础设施建设水平，并依据其中位数将样本划分为高数字基础设施城市企业组和低数字基础设施城市企业组，分别进行回归分析。回归结果如表7（下页）所示。其中，列（1）*lnDRI*的回归系数显著为正，表明在数字基础设施建设水平较高的地区，实数技术融合能够显著增强制造业企业供应链的抵抗力；列（3）和列（4）*lnDRI*的回归系数均显著为正，说明在数字基础设施建设水平较低的地区，实数技术融合能够增强制造业企业供应链的抵抗力和恢复力。原因在于：在数字基础设施建设水平较高的地区，完善的信息网络和数据传输体系提高了企业对市场需求、供应状态及潜在风险的实时感知能力，使实数技术融合更容易嵌入企业生产运营和供应链管理全过程。企业能够通过实时监测、风险预警和动态决策等方式提前识别并缓释外部冲击，因而实数技术融合的作用更多体现为对供应链抵抗力的增强。相较而言，在数字基础设施建设水平较低的地区，企业原有数字化基础相对薄弱，供应链运行过程存在较大的优化空间。实数技术融合不仅有助于提升企业对外部冲击的应对能力，而且能够通过改善资源配置效率、优化生产组织方式、强化供应链协同，帮助企业在冲击发生后更快恢复正常运营，因而同时表现出对供应链抵抗力和恢复力的促进作用。

表 7 数字基础设施建设异质性分析回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	高数字基础设施建设水平		低数字基础设施建设水平	
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI	0.004**	0.247	0.007***	0.676***
	(0.002)	(0.177)	(0.002)	(0.241)
控制变量	是	是	是	是
常数项	0.727***	−7.905*	0.812***	−4.465
	(0.055)	(4.142)	(0.039)	(3.815)
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
N	7 201	7 201	7 191	7 191
Adj-R^2	0.304	0.226	0.306	0.242

注：由于各城市 4G 基站数量数据自 2014 年起才可获得，因而样本量有所减少。

（二）气候物理风险

气候物理风险是影响制造业企业供应链稳定运行的重要外生冲击来源。极端低温、高温、强降雨和干旱等气候事件不仅会直接干扰企业生产活动和物流运输，还可能通过要素供给受限和成本波动放大供应链运行的不确定性。基于此，本文借鉴 Guo 等[48]的研究，采用城市气候物理风险指数衡量企业所面临的气候物理风险水平。该指数综合反映极端低温天数、极端高温天数、极端降雨天数和极端干旱天数四类气候冲击，并根据其中位数将样本划分为高气候物理风险城市企业组和低气候物理风险城市企业组，分别进行回归分析。回归结果如表 8 所示。其中，列(3)和列(4)*lnDRI* 的回归系数均显著为正，说明在气候物理风险较低的地区，实数技术融合能够显著增强制造业企业供应链的抵抗力和恢复力。原因在于：在气候物理风险较低的地区，企业生产经营活动受到极端天气事件的干扰相对较少，供应链运行环境更为稳定，实数技术融合能够更充分地发挥信息整合、资源优化配置和协同管理等优势，提高企业对潜在风险的识别和应对能力，并增强冲击发生后的恢复能力。因此，实数

表 8 气候物理风险异质性分析结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	高气候物理风险		低气候物理风险	
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI	0.003	0.163	0.006***	0.964***
	(0.002)	(0.175)	(0.002)	(0.261)
控制变量	是	是	是	是
常数项	0.764***	−9.973***	0.784***	−4.889
	(0.037)	(2.783)	(0.042)	(4.098)
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
N	6 409	6 409	6 342	6 342
Adj-R^2	0.317	0.218	0.280	0.256

注：由于气候物理风险数据存在大量缺失值，因而样本量有所减少。

技术融合对供应链抵抗力和恢复力均表现出显著促进作用。相较而言，在气候物理风险较高的地区，频繁发生的极端天气事件会对生产、运输和供应链协同造成持续冲击，部分抵消实数技术融合带来的治理效应，从而削弱其对供应链韧性的促进作用。

（三）不确定性感知

企业对经济政策不确定性的主观感知是影响其风险决策和技术选择的重要因素[49]。经济政策不确定性上升往往会加剧企业对未来需求、制度环境和投资回报的不确定预期，进而强化其对供应链中断、要素供给波动以及经营连续性风险的关注。本文借鉴聂辉华等[49]的研究，通过构建“经济政策词语”与“不确定性词语”词典，对企业年报 MD&A 部分进行文本识别。当句子同时包含两类词语时，将其判定为“经济政策不确定性句子”。以该类句子中不确定性词语数量占该部分总词语数量的比重衡量企业经济政策不确定性感知水平。进一步地，本文按照该指标的中位数将样本划分为高不确定性感知企业组和低不确定性感知企业组，并分别进行回归分析。回归结果如表 9 所示。其中，列（1）和列（2）*lnDRI* 的回归系数均显著为正，表明当企业对经济政策不确定性的感知程度较高时，实数技术融合能够同时显著增强制造业企业供应链的抵抗力和恢复力；列（3）*lnDRI* 的回归系数显著为正，说明在外部政策环境相对稳定的情形下，实数技术融合主要通过强化事前风险缓冲途径提升供应链的抵抗力。原因在于：当企业面临较高的经济政策不确定性时，对外部风险的敏感度和应对需求显著提升，更倾向于借助实数技术融合强化信息搜集、风险识别和资源调度能力。实数技术融合不仅有助于企业及时识别潜在风险并降低冲击发生概率，而且能够提高供应链各环节之间的信息共享和协同响应效率，增强企业在冲击发生后的资源重组和运营恢复能力，因而同时表现出对供应链抵抗力和恢复力的促进作用。相较而言，在经济政策不确定性感知较低的情形下，企业面临的外部环境相对稳定，供应链遭受重大冲击的可能性较低，实数技术融合的作用更多体现为维持产能稳定、强化风险预警和事前防范能力，从而主要表现为对供应链抵抗力的促进作用。

（四）所有制属性

企业所有制属性在很大程度上塑造了其资源获取能力、风险承受能力以及对外部冲击的应对方式，从而可能影响实数技术融合作用于供应链韧性的路径和效果。本文根据企业所有制属性将样本划分为国有企业和非国有企业两组，分

表 9 不确定性感知异质性分析结果

	（1）	（2）	（3）	（4）
	高不确定性感知		低不确定性感知	
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI	0.004**	0.565***	0.004**	0.135
	（0.002）	（0.208）	（0.002）	（0.164）
控制变量	是	是	是	是
常数项	0.796***	−3.521	0.774***	−5.393*
	（0.035）	（2.932）	（0.035）	（3.089）
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
N	8 538	8 538	8 538	8 538
Adj-R^2	0.294	0.223	0.306	0.230

注：由于企业经济政策不确定性感知指标存在缺失值，因而样本量有所减少。

别进行回归分析。回归结果如表10所示。其中，列(2)*lnDRI*的回归系数显著为正，表明实数技术融合能够显著增强国有制造业企业供应链的恢复力；列(3)*lnDRI*的回归系数显著为正，说明实数技术融合能够增强非国有制造业企业供应链的抵抗力。原因在于，国有企业通常拥有较强的资源调动能力、组织协调能力和风险缓释能力，在受到外部冲击后，能够依托实数技术融合强化供应链各环节之间的信息共享和协同联动，加快资源重组、生产调整和经营修复进程，从而提升供应链恢复力。相较之下，非国有企业面临更为严格的预算约束和市场竞争压力，其推进实数技术融合更多用于提高运营效率、强化风险识别和优化供应链管理，通过降低供应链中断风险和增强事前预警能力来提升供应链抵抗力。

七、研究结论与政策建议

在全球供应链深度重构和外部冲击频发的背景下，推动实体经济和数字经济深度融合，已成为提升制造业供应链韧性、构建新发展格局和实现高质量发展的关键路径。本文基于大语言模型构建企业实数技术融合指标，并结合中国制造业上市公司数据，实证检验了实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响及其内在作用机制。研究主要结论如下：第一，实数技术融合能够显著提升制造业企业供应链的抵抗力和恢复力，该结论在多种内生性处理和稳健性检验下依然成立，具备较强的可靠性和稳健性。第二，机制检验结果表明，实数技术融合能够通过增强信息联通、优化资源配置和强化风险防控提升制造业企业供应链韧性。第三，异质性分析进一步揭示了实数技术融合对供应链韧性影响的情境差异。具体而言，在数字基础设施建设水平较高的地区，实数技术融合主要表现为提升制造业企业供应链的抵抗力；而在数字基础设施相对薄弱的地区，其不仅能够增强供应链抵抗力，还能够显著提升供应链恢复力。就气候物理风险而言，实数技术融合对供应链韧性的促进作用主要体现在气候风险相对较低的地区，能够同时增强供应链抵抗力和恢复力，而在气候风险较高的地区，其作用效果受到一定制约。进一步地，从不确定性环境看，当企业对经济政策不确定性的感知程度较高时，实数技术融合能够同时显著增强制造业企业供应链的抵抗力和恢复力；而在外部政策环境相对稳定的情形下，其作用主要体现为提升供应链抵抗力。从企业所有制属性看，实数技术融合对不同所有制企业呈现差异化影响：

表10 所有制属性异质性分析结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	国有企业		非国有企业	
	*SCR*1	*SCR*2	*SCR*1	*SCR*2
lnDRI	0.002	0.573**	0.004**	0.048
	(0.003)	(0.262)	(0.002)	(0.162)
控制变量	是	是	是	是
常数项	0.801***	0.496	0.800***	−6.602**
	(0.049)	(4.753)	(0.036)	(3.092)
年份固定效应	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是
N	4 882	4 882	11 919	11 919
Adj-R^2	0.319	0.310	0.306	0.211

注：由于企业所有制属性数据存在缺失值，因而样本量有所减少。

在国有制造业企业中,其作用主要表现为提升供应链恢复力;而在非国有制造业企业中,则主要表现为增强供应链抵抗力。

基于上述结论,提出如下政策建议:

第一,以数字技术创新驱动实数深度融合,为制造业供应链韧性提升提供技术支撑。本文发现,实数技术融合能够显著增强制造业企业供应链韧性。因此,应聚焦工业互联网、区块链、数字孪生等关键数字技术,强化其在供应链全流程中的渗透和应用。一方面,加大对供应链智能协同技术的研发投入,鼓励企业、高校和科研院所联合攻关,突破多源数据融合、智能决策优化等核心技术瓶颈,加快构建自主可控的制造业供应链数字技术体系;另一方面,加速数字技术在供应链场景中的落地转化,针对制造业内部各细分行业特点,开发适配性强的智能预警系统(如基于AI的供应链中断风险评估工具)和动态响应平台(如基于区块链的跨境供应链协同网络),实现从风险感知到弹性恢复的全链条数字化赋能。同时,前瞻性布局供应链"元宇宙"、量子计算等未来技术领域,以技术代际跃迁重塑全球供应链竞争格局,为中国制造业企业在复杂多变的国际环境中提供坚实的底层技术保障,赢得战略韧性优势。

第二,畅通实数技术融合提升制造业企业供应链韧性的关键传导路径。研究发现,实数技术融合对制造业企业供应链韧性的促进作用,主要通过增强信息联通、优化资源配置、强化风险防控等机制实现。因此,亟须从制度环境、要素配置和治理体系等层面协同发力,打通其作用链条。首先,着力改善信息基础条件和数据要素流通环境,降低企业在供应链协同中的信息摩擦成本。通过完善数据共享规则、推进产业链上下游信息系统互联互通,引导企业在采购、生产、物流和库存管理等环节深化数字化应用,提升供应链运行的透明度和可视化水平,从而增强企业对外部冲击的前瞻识别能力和快速响应能力。其次,以实数技术融合为抓手,促进要素在企业与供应链体系内部的优化配置。通过支持企业将数字技术深度嵌入投资决策、人力资源配置和生产组织管理过程,引导资本、劳动力、技术等生产要素向效率更高、协同更优的环节流动,提高资源配置效率和要素协同水平,缓解资本配置偏离与劳动资源错配问题,增强企业对市场变化和外部冲击的适应能力,进而提升供应链整体运行效率和韧性水平。最后,通过完善风险治理和约束方式,强化实数技术融合在供应链风险防控中的制度支撑。鼓励企业利用数字化手段健全内部控制和风险预警体系,加强对财务风险、运营风险及外部冲击的动态监测和管理,并通过优化融资环境、完善风险分担安排,提升企业及供应链系统在不确定环境下的抵抗力和恢复力。

第三,坚持"因业施策",实施差异化的实数技术融合推进策略。本文发现,实数技术融合对制造业企业供应链韧性的影响在不同基础条件、外部环境和企业属性下呈现显著差异,因而有必要根据区域发展阶段、风险暴露程度和企业特征,因地制宜、分类施策,引导实数技术融合精准发力。具体而言,在数字基础设施建设水平较高的地区,应进一步推动实数技术向供应链关键环节深度嵌入,充分发挥数据实时感知、智能决策和协同管理优势,增强供应链抵御外部冲击的能力;在数字基础设施相对薄弱的地区,则应加快数字基础设施建设和基础性数字化改造,降低企业数字化应用门槛,充分释放实数技术融合提升供应链韧性的综合效应。对于不同风险环境,应强化分类引导。在气候物理风险较高的地区和行业,应加快构建数字化风险监测、预警和应急响应体系,提高供应链风险缓释能力;对于经济政策不确定性感知较高的企业,则应鼓励其将实数技术广泛应用于风险识别、资源调度和供应链协同管理,增强动态响应能力和风险应对能力。此外,还应充分考虑企业所有制差异。针对国有制造业企业,应发挥其资源整合和组织协调优

势，推动实数技术深度融入供应链协同管理体系，提升供应链恢复能力；针对非国有制造业企业，则应通过强化融资支持、优化数字化服务供给和降低技术应用成本等措施，引导其利用实数技术提升风险预警和供应链管理水平，增强供应链抵御外部冲击的能力。*Reform*

参考文献

[1]沈国兵.美国供应链政策战略调整与中国应对[J].人民论坛·学术前沿，2023(3)：78–85.

[2]张伯伟，马凡慧.智能制造如何提升产业链供应链韧性：理论机制与实证检验[J].经济学动态，2024(11)：20–37.

[3]王梓琪，周国富.数字化转型与制造业供应链韧性[J].统计研究，2025(9)：17–30.

[4]黄先海，高亚兴.数实产业技术融合与企业全要素生产率——基于中国企业专利信息的研究[J].中国工业经济，2023(11)：118–136.

[5]洪银兴，任保平.数字经济与实体经济深度融合的内涵和途径[J].中国工业经济，2023(2)：5–16.

[6]陈雨露.数字经济与实体经济融合发展的理论探索[J].经济研究，2023(9)：22–30.

[7]蒋为，倪诗程，彭淼.数实融合与企业出口产品策略优化：基于柔性生产视角[J].世界经济，2024(5)：3–33.

[8]Sun G, Fang J, Li J, et al. Research on the impact of the integration of digital economy and real economy on enterprise green innovation [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 200: 123097.

[9]张兵，张露文，周宏伟.数实产业技术融合对我国企业全球价值链稳定性的影响研究[J].国际经贸探索，2025(2)：36–53.

[10]余东华，陈海谦.“十五五”时期新质生产力与未来产业互动发展路径探析[J].改革，2025(9)：36–46.

[11]李建奇，黄维晨.“数实融合”下的平台经济与包容性就业——基于网络招聘大数据的经验研究[J].财经研究，2024(10)：34–48.

[12]Liu B, Huang Y, Chen M, et al. Towards sustainability: how does the digital–real integration affect regional green development efficiency? [J]. Economic Analysis and Policy, 2024, 83: 42–59.

[13]周密，王雷，郭佳宏.新质生产力背景下数实融合的测算与时空比较——基于专利共分类方法的研究[J].数量经济技术经济研究，2024(7)：5–27.

[14]张少华，木鑫，陈鑫，等.中国数字经济和实体经济的融合研究：社会再生产过程视角[J].中国软科学，2024(11)：35–45.

[15]史丹，孙光林.数字经济和实体经济融合对绿色创新的影响[J].改革，2023(2)：1–13.

[16]杨继东，高秋男，刘守英.数字经济、数字产品空间与实数融合发展——基于技术关联与比较优势耦合协调视角[J].中国工业经济，2025(3)：78–96.

[17]何德旭，张昊，刘蕴霆.新型实体企业促进数实融合提升发展质量[J].中国工业经济，2024(2)：5–21.

[18]谢思，房克雷，和军.智慧城市建设能否促进数实融合？——基于双重机器学习的因果推断[J].产业经济研究，2024(4)：100–113.

[19]陈凯旋，张树山.制度型开放与数实融合——来自自由贸易试验区设立的证据[J].现代财经(天津财经大学学报)，2024(9)：52–68.

[20]王晓丹，石玉堂，刘达.数据要素市场化配置对数实融合的影响研究——基于数据交易平台设立的准自然实验[J].广东财经大学学报，2024(2)：44–58.

[21]Hosseini S, Al Khaled A, Sarder M D. A general framework for assessing system resilience using Bayesian networks: a case

study of sulfuric acid manufacturer[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 41: 211–227.

[22]Gölgeci I, Kuivalainen O. Does social capital matter for supply chain resilience? The role of absorptive capacity and marketing–supply chain management alignment[J]. Industrial Marketing Management, 2020, 84: 63–74.

[23]张树山,谷城.供应链数字化与供应链韧性[J].财经研究,2024(7):21–34.

[24]王珍珠,袁平红,周明生.全国统一大市场建设如何影响企业供应链韧性[J].财经科学,2025(2):74–89.

[25]苏栋芳,王婷伟,白雨露,等.数字金融与制造业企业供应链韧性提升[J].经济评论,2025(1):87–101.

[26]沈国兵,沈彬朝.高标准贸易协定与全球供应链韧性:制度环境视角[J].经济研究,2024(5):151–169.

[27]Zhao N, Hong J, Lau K H. Impact of supply chain digitalization on supply chain resilience and performance: a multi–mediation model[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 259: 108817.

[28]袁业虎,吴端端.企业数字化转型与供应链韧性——基于供应链溢出的视角[J].系统工程理论与实践,2025(7):2309–2326.

[29]肖红军,沈洪涛,周艳坤.客户企业数字化、供应商企业ESG表现与供应链可持续发展[J].经济研究,2024(3):54–73.

[30]陶锋,王欣然,徐扬,等.数字化转型、产业链供应链韧性与企业生产率[J].中国工业经济,2023(5):118–136.

[31]巫强,姚雨秀.企业数字化转型与供应链配置:集中化还是多元化[J].中国工业经济,2023(8):99–117.

[32]Akerlof G A. The market for "lemons": quality uncertainty and the market mechanism[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1970, 84(3): 488–500.

[33]Hsieh C T, Klenow P J. Misallocation and manufacturing TFP in China and India[J]. The Quarterly Journal of Economics, 2009, 124(4): 1403–1448.

[34]黄卓,陶云清,刘兆达,等.智能制造如何提升企业产能利用率——基于产消合一的视角[J].管理世界,2024(5):40–57.

[35]Bloom N. The impact of uncertainty shocks[J]. Econometrica, 2009, 77(3): 623–685.

[36]郭家琛,赵景峰,刘珊,等.数智化转型平抑了制造企业供应链风险吗?——基于供需关系的视角[J].经济评论,2025(1):70–86.

[37]许民利,王雨莎,简惠云. ESG评级分歧对制造业供应链韧性的影响研究[J].改革,2025(10):94–112.

[38]李雪松,赵宸宇,聂菁.对外投资与企业异质性产能利用率[J].世界经济,2017(5):73–97.

[39]邓慧慧,刘宇佳,王强.人工智能发展如何提升供应链韧性?——基于上市公司的经验证据[J].浙江大学学报(人文社会科学版),2024(6):5–23.

[40]金星晔,左从江,方明月,等.企业数字化转型的测度难题:基于大语言模型的新方法与新发现[J].经济研究,2024(3):34–53.

[41]杨亚平,余梦玲,刘歆.技术交易网络嵌入与企业关键核心技术突破——基于中国专利转让数据的研究[J].数量经济技术经济研究,2026(6):185–210.

[42]孙伟增,张柳钦,万广华,等.政务服务一体化对资本流动的影响研究——兼论政府在全国统一大市场建设中的作用[J].管理世界,2024(7):46–68.

[43]钞小静,廉园梅,元茹静,等.数字基础设施

建设与产业链韧性——基于产业链恢复能力数据的实证分析[J].数量经济技术经济研究,2024(11):112-131.
[44]赵春明,李晓凡,郭家琛.服务贸易制度创新是否增强地区产业链韧性?——来自服务贸易创新发展试点的证据[J].国际贸易,2024(12):5-17.
[45]江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].中国工业经济,2022(5):100-120.
[46]宋敏,周鹏,司海涛.金融科技与企业全要素生产率——"赋能"和信贷配给的视角[J].中国工业经济,2021(4):138-155.
[47]倪婷婷,王跃堂.区域行政整合、要素市场化与企业资源配置效率[J].数量经济技术经济研究,2022(11):136-156.
[48]Guo K, Ji Q, Zhang D. A dataset to measure global climate physical risk[J]. Data in Brief, 2024, 54: 110502.
[49]聂辉华,阮睿,沈吉.企业不确定性感知、投资决策和金融资产配置[J].世界经济,2020(6):77-98.

The Impact of Real-Digital Technology Integration on Supply Chain Resilience of Manufacturing Firms: Evidence from Large Language Models and Patent Texts

Yang Yaping Liu Xin Liu Xinyu

Abstract: Enhancing the resilience of industrial and supply chains has become a strategic cornerstone for safeguarding national economic security and social stability. However, against the backdrop of rising security risks in manufacturing supply chains, research on how real-digital technology integration can effectively strengthen the supply chain resilience of manufacturing firms remains relatively limited. To address this gap, this paper employs large language models to semantically analyze over 830,000 invention patent abstracts from A-share listed firms in China, constructing a novel indicator to measure firms' level of real-digital technology integration. Combining this with firm-level supply chain resilience data, we investigate the impact of real-digital technology integration on supply chain resilience in manufacturing firms. The results show that real-digital technology integration significantly enhances supply chain resilience, with notable heterogeneity across levels of digital infrastructure development, climate-related physical risk, perceived uncertainty, and ownership structure. Mechanism analyses further reveal that real-digital technology integration improves supply chain resilience primarily through enhancing information connectivity, optimizing resource allocation, and strengthening risk prevention and control.

Key words: real-digital technology integration; supply chain resilience; manufacturing firms

(责任编辑:罗重谱)