·经济学研究·
DOI:10.20004/j.cnki.ujn.2026.01.007

制造业智能化、绿色化、融合化发展的机制与路径研究

——兼论“十五五”时期制造业发展

李　钢　贾晓燕　刘戒骄

[摘　要]制造业是立国之本、强国之基。“十五五”时期是我国制造业迈向高质量发展、构建现代化产业体系的关键阶段,推动其向智能化、绿色化、融合化发展具有重要意义。本文在系统梳理相关研究的基础上,首先界定制造业智能化、绿色化和融合化的内涵,提出智能化是借助新一代信息技术和人工智能构建具有动态自优化特征的制造系统,绿色化是基于技术与治理突破价值观念边界实现经济效益与生态效益的协同,融合化是基于产业内外互动突破产业生态边界形成新的产业形态。其次,借鉴产业—生态共演机制,构建制造业“三化”互动的理论框架,阐释其在纵向、横向及纵横向三个维度上的互动机制,并结合工业互联网平台、垂直领域大模型、生产性服务业和科技金融等四大领域阐述其实践路径。最后,针对制造业“三化”发展中的政策支持、技术融合、产业协同等关键环节,提出相应的发展路径与对策,并从政策体系、核心技术、人才梯队、基础设施四个维度提出协同推进建议,以期为我国制造业转型升级与竞争力提升提供理论参考与政策启示。

[关键词]制造业智能化;制造业绿色化;制造业融合化;产业—生态共演;工业互联网;“十五五”规划

一、引言

回顾历史,国内外经济发展已先后经历三次工业革命,目前正处于第四次工业革命进程中。从工业革命的划分视角看,制造业的演进历程依次经历了:第一次以机器制造为标志,第二次以大规模标准化制造为特征,第三次以自动化制造为核心,第四次则迈向以智能化、网络化和个性化为核心的智能制造阶段。中国相应工业方面的发展主要是依据中华人民共和国成立后每五年制定的计划或规划展开,因而国内制造业的转变历程依次是:“一五”计划至“五五”计划主要是以重工业为中心,并且调整优化重工业与农业、轻工业之间的发展比例;“六五”计划至“九五”计划主要是优化重工业比例和产品结构,同时提出支柱产业、引入市场竞争机制;“十五”计划至“十一五”规划主要是与信息化结合,并且促使其与第一产业和第三产业协同带动经济发展;“十二五”规划至“十四五”规划主要是发展战略性新兴产业,注重其与城镇化、信息化协同推进,注重其与现代服务业的融合,同时注重智能制造和绿色制造,培育先导性产业。

通过梳理国内外经济发展中对应制造业的转变历程,可以知道制造业在各国经济社会发展中

[基金项目]中国社会科学院实验室孵化专项资助项目“中国包容性绿色发展政策评估实验室”(项目编号:2024SYFH0004);中国社会科学院“登峰战略”优势学科(产业经济学)(项目编号:DF2023YS24)。

[作者简介]李钢,南京信息工程大学商学院教授,中国社会科学院工业经济研究所研究员、博士生导师;贾晓燕(通讯作者),南京信息工程大学商学院博士研究生,邮箱:jxy__0214@163.com;刘戒骄,江西服装学院商学院教授,中国社会科学院工业经济研究所研究员、博士生导师。

都发挥着重要作用，同时目前全球制造业的发展都关注智能制造这一方面，这表明中国目前关键领域的生产力水平已接近或达到世界先进国家水平。但当前各国制造业发展存在的问题各异。美国制造业存在的问题是空心化严重，德国制造业存在的问题是关键技术创新乏力，日本制造业存在的问题是模式创新迟滞和劳动力结构性短缺，中国制造业存在的问题是比较优势逻辑需要重构和供应链风险加剧①。为应对供应链风险，需要从产业链纵向“卡脖子”与横向去中心化两个方面着手。从前者来看，“卡脖子”技术包括光刻机、芯片、操作系统等相关领域，虽然中国在上述核心领域与关键环节取得重要突破，但是国产化芯片和操作系统等软件和硬件技术仍落后于主要发达经济体②，所以实现纵向产业链关键环节的自主可控有助于应对供应链风险。从后者来看，近年来部分发达经济体在地缘政治与经济安全考量下，通过“去风险化（de-risking）”“友岸外包”“近岸外包”等方式，有意降低对中国制造的依赖度，压缩中国在全球制造网络中的份额和中心地位。这种外生性的供应链去中心化带来全球生产体系协同效率下降、系统工程能力碎片化以及产业战略协调难度上升等问题。同时，各国制造业发展中的问题为孕育新一轮科技革命与产业变革提供了可能。当前中国正站在这一历史交汇点，处于决定未来全球分工格局的关键窗口期，其核心任务已从追赶转为引领。在上述背景下，抢占以人工智能、生物科技、新能源、新材料为代表的未来产业赛道，是关乎竞争力与经济安全的必然选择，更关乎中国能否在全新的竞争维度上，定义并掌握未来发展的主导权。通过梳理未来产业的研究③，本文认为未来产业是由突破性技术或颠覆性技术驱动，与产业化进程匹配的居于全球价值链高附加值环节的动态高端产业，是未来战略性新兴产业。

2021年3月12日《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中对制造业的要求是促进先进制造业和现代服务业深度融合，增强制造业竞争优势，推动制造业优化升级，深入实施智能制造和绿色制造工程，发展服务型制造新模式，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。由于产业高端化是以技术与制度创新引导产业从低端向高端环节攀升的过程，因而本文认为制造业高端化是指制造业从相对低端向以高科技、高附加值、高智力密集型为特征的高端不断攀升的可持续发展过程。由于未来产业是由突破性技术或颠覆性技术驱动，与产业化进程匹配的居于全球价值链高附加值环节的动态高端产业，所以在一定程度上未来产业不仅可以表征制造业高端化，而且可以预示制造业未来的走向。基于《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中对制造业的高端化、智能化、绿色化的要求，可以认为是对未来产业智能化、绿色化的要求。鉴于未来产业在一定程度上能够预示制造业的发展方向，对未来产业智能化与绿色化的要求亦可相应转化为对制造业智能化与绿色化发展的要求。2025年10月28日《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》中对现代化产业体系的要求是坚持智能化、绿色化、融合化方向，保持制造业合理比重，构建以先进制造业为骨干的现代化产业体系。因而对新时期制造业的要求也需要保持智能化、绿色化、融合化的方向。

从“十四五”时期对制造业高端化智能化绿色化的要求转变至“十五五”时期对制造业智能化绿色化融合化的要求是发展的必然结果。不同于“十四五”时期的制造业，“十五五”时期的制造业更侧重在高端化制造业即未来产业方面。“十五五”时期制造业智能化绿色化融合化的要求是对“十四五”时期制造业高端化智能化绿色化的延伸与扩展，体现着现代化产业体系的发展方向。“十五五”时期是中国制造业由规模扩张向质量跃升转型的关键攻坚期，是建设自主可控现代化产业

①刘志彪，严文沁：《从“世界工厂”到“智造强国”：中国制造业转型的逻辑与策略》，《财经问题研究》，2025年第11期。

②许明：《提升我国产业链安全水平：进展、挑战与优化路径》，《北京师范大学学报》（社会科学版），2024年第6期。

③余东华：《“十四五”期间我国未来产业的培育与发展研究》，《天津社会科学》，2020年第3期。

体系的历史性窗口[①],该时期制造业智能化、制造业绿色化、制造业融合化(制造业“三化”)的共同作用,将从根本上重塑制造业的发展范式、价值来源和竞争逻辑。因而明晰制造业智能化、制造业绿色化、制造业融合化发展的机制与路径有助于分析并预测下一阶段制造业竞争格局,有助于重塑引领经济向更高效、更可持续未来迈进的核心引擎,能够不断契合产业化进程,适应社会主义发展每个阶段的新形势与新要求。本文首先在系统梳理有关智能化、绿色化、融合化研究的基础上,抽象得出对应制造业智能化、制造业绿色化、制造业融合化的内涵;其次基于产业—生态共演机制描绘出制造业“三化”的理论与实践互动机制;最后基于制造业“三化”发展路径中可能存在的堵点问题,提出对应发展路径的措施,并从政策、技术、人才、设施四维协同角度给出促进制造业智能化、绿色化、融合化发展的建议。

二、制造业智能化、绿色化、融合化发展的机制

本文旨在构建一个理解制造业“三化”发展的系统性理论分析框架。该框架遵循概念界定、理论构建和机制阐释的逻辑递进关系:首先,对制造业“三化”进行内涵界定,明确其各自的价值目标与作用边界,这是机制分析的逻辑起点;其次,引入产业—生态共演机制作为元理论,将制造业“三化”置于经济系统与生态系统双向反馈的动态过程中进行审视,揭示其内在的理论关联与互动逻辑;最后,在前述基础上,从纵向、横向及纵横交织三个维度,系统剖析制造业“三化”之间以及其与产业系统之间复杂的互动机制,并阐述其通过工业互联网平台、垂直领域大模型、生产性服务业与科技金融四大领域协同落地的实践逻辑。通过这一框架,本文力图揭示制造业“三化”发展并非三者孤立发展的简单叠加,而是一个以技术融合为驱动、以价值跃迁为导向、以生态重构为归宿的深度协同与共演过程。

(一)制造业“三化”内涵

在界定制造业“三化”内涵之前,需要对相关文献进行梳理。第一,学界有关制造业智能化的研究数量众多,主要聚焦于制造业智能化对出口复杂度[②]、制造业结构优化[③]、企业出口产品质量[④]等方面的研究,但有关制造业智能化内涵的理论研究数量较少。学界中较早对制造业智能化内涵作出界定的是李廉水等的研究[⑤],在该研究中指出制造业智能化是以数字化制造开始,发展网络化制造,最终实现智能制造的发展历程。有学者认为制造业智能化是将新一代信息通信技术应用至产品制造过程中,以实现生产环节、管理模式和服务销售智能化,充分挖掘制造业潜力。也有学者认为制造业智能化是将新一代人工智能技术与先进制造技术有机结合,共同赋能于企业生产经营系统,强调新一代智能工业机器人对人脑与体力的替代,以此实现人、机、网的高度融合和互动。同时,有研究提出应主要从“条件—过程—结果”三个逻辑维度对制造业智能化内涵进行详细阐述[⑥]。

---

①王钦,陶鸠:《迈向“十五五”时期的中国制造业:战略任务与推进路径》,《延边大学学报》(社会科学版),2025年第5期。

②张龙鹏,张双志,胡燕娟:《产业智能化对出口复杂度的影响:兼论人口老龄化的调节作用》,《产业经济评论》,2023年第2期。

③刘军,常慧红,张三峰:《智能化对中国制造业结构优化的影响》,《河海大学学报》(哲学社会科学版),2019年第4期。

④刘文革,耿景珠,杜明威:《制造业智能化与企业出口产品质量:来自中国的微观证据》,《商业经济与管理》,2023年第1期。

⑤李廉水,石喜爱,刘军:《中国制造业40年:智能化进程与展望》,《中国软科学》,2019年第1期。

⑥肖沁霖,邓宗兵,文江雪:《中国制造业智能化发展的空间关联网络与形成机制研究》,《科技进步与对策》,2025年第19期。

第二，学界有关制造业绿色化的直接研究数量不多，并且主要是从制造业绿色发展等角度，一方面是探究智能制造[①]、数字经济[②]、绿色金融发展[③]等如何促进制造业绿色发展，另一方面是探究制造业绿色发展的水平[④]以及相应提升路径[⑤]等。已有研究多聚焦于现实应用，鲜少直接涉及制造业绿色化的内涵理论研究。第三，学界有关制造业融合化的理论研究不多，主要从实践角度探讨产业融合测度、路径与发展中存在的问题[⑥]，其中产业融合包括数字经济产业、生产性服务业以及物流业与制造业的融合。

第一，制造业智能化的内涵。学界有关制造业智能化内涵的研究数量较少。相关学者在制造业智能化内涵方面形成的共识主要体现在制造业智能化是将核心先进技术融合至生产、管理和服务过程中，最终提升的是经济效益和社会效益[⑦]。存在分歧的地方在于对制造业智能化核心先进技术构成的判定不同：一种观点主张其由人工智能与信息通信技术融合而成；另一种观点强调其是人工智能技术与先进制造技术深度结合的产物；也有观点认为，智能化技术本身即是决定性的核心。其技术基础主要体现为两种技术的融合，或由单一核心技术主导。制造业智能化的过程与结果，本质上是特定技术与具体制造业深度融合并产生附加值的过程。其实施路径清晰，行业间共识度高，无明显分歧。制造业智能化的实现条件因其依赖的核心先进技术不同而存在显著差异。以初始阶段——数字化制造为例，其核心先进技术是数字化技术。该技术主要推动传统设计向计算机辅助设计的转型，并实现传统生产向自动化制造的升级。而在发展阶段——网络化制造中，核心先进技术转变为信息与通信技术。该技术旨在促成传统企业沟通模式向基于互联网的跨企业信息交互的变革，并推动企业内部独立生产向企业间网络化协同生产的演进。因而制造业智能化的关键在于先进技术。据此，本文认为制造业智能化是基于信息通信技术、人工智能技术与数字化技术三者整合而成的先进技术，并将其融合至高附加值产业产品制造全过程全场景，优化产业结构，提升生产效率，实现经济效益和数量型社会效益的同步提升。基于有形边界与无形边界的划分，本文认为数智技术的形成突破的是技术理论边界，数智技术融合产品制造突破的是技术实践边界。因而本文最终认为制造业智能化是遵循理论突破与实践重构的双轮驱动范式，以数智技术的开发和融合创新突破理论边界，以技术驱动的产品与服务融合突破实践边界，最终在微观层面实现经济效益跃迁，在宏观层面达成可量化的社会效益提升。在本文的论述框架内，制造业智能化与制造业数智化的内涵重合，作为同义概念使用。本文对其定义的特殊性在于技术构成方面是以信息通信技术、人工智能及数字化技术三者融合为核心。

第二，制造业绿色化的内涵。学界对制造业绿色化的现有研究多集中于实践应用层面，而对其理论内涵的系统性探讨尚显不足。本文旨在沿着绿色化、产业绿色化和制造业绿色化的逻辑脉络展开，以系统阐释并厘清制造业绿色化的核心内涵。在绿色化方面，学界对其内涵已进行充分探讨，综合比较不同学者的相关观点可以发现绿色化的核心目标在于实现环境效益与经济效益的协

①牛志伟，郑李昂：《智能制造能否驱动制造业企业绿色化转型——来自中国智能制造产业政策的准自然实验》，《南昌大学学报》（人文社会科学版），2025年第5期。

②程广斌，栗靖茹，吴家庆：《数字经济、研发要素流动与高技术制造业绿色创新效率》，《统计与信息论坛》，2025年第10期。

③安勇，赵丽霞，张清华：《绿色金融发展、政府行为与制造业绿色转型》，《商业研究》，2025年第5期。

④田泽，方琪，鞠云等：《中国三大流域制造业绿色转型效率评价及影响因素研究》，《长江流域资源与环境》，2023年第10期。

⑤武汉大学国家发展战略研究院课题组：《推进制造业绿色低碳转型的路径选择》，《中国行政管理》，2023年第1期。

⑥武晓婷，张恪渝：《中国数字经济产业与制造业融合测度研究》，《统计与信息论坛》，2022年第12期；史宇鹏：《数字经济与制造业融合发展：路径与建议》，《人民论坛·学术前沿》，2021年第6期。

⑦李健旋：《中国制造业智能化程度评价及其影响因素研究》，《中国软科学》，2020年第1期。

同提升[①]。产业绿色化方面,学界对其整体概念尚未形成统一、明确的共识,相关研究主要集中于具体产业领域,如农业绿色化[②]。通过对产业绿色化及其在农业等具体领域的内涵研究进行综合分析,可以发现产业绿色化的核心目标在于实现以环境效益与经济效益为主、社会效益为辅的协同增益。为全面深刻理解制造业绿色化的内涵,需要明确制造业绿色化系统如何构成。制造业绿色化系统应包括以绿色生产和绿色创新为核心的经济新动能系统和以资源消耗和污染治理为核心的可持续经济发展系统。结合产业绿色化内涵与制造业绿色化系统构成,本文首先认为制造业绿色化是绿色生产和绿色治理的集合体,其中绿色生产借助高科技含量绿色清洁技术展开,绿色治理是对生产前后产生的环境负外部性进行治理,最终产出绿色产品。主要实现的是经济效益和环境效益为主,质量型社会效益为辅的综合效益提升。由于价值边界中的价值可理解为价值判断偏好,同时制造业绿色化体现的是由传统型产品转变为绿色化产品的偏好,所以本文最终认为制造业绿色化是基于绿色技术和绿色治理突破价值理念边界的范式,以实现经济效益和环境效益为主、质量型社会效益为辅的效益提升。

第三,制造业融合化的内涵。在明确制造业融合化的内涵之前,首先需要明确产业融合或产业融合化的内涵。学界中关于产业融合的研究数量颇多,认为产业融合是不同产业或同一产业内的不同行业相互渗透、相互交叉,最终融为一体形成新产业的动态发展过程[③],并且主要从产业融合条件和产业融合成效两个方面理解产业融合化。因而本文认为制造业融合化是以制造业内融合发展为主,以制造业间融合发展为辅。由于技术为产业生态建立基础,需求决定产业生态方向,二者协同发力助推产业生态高质量发展,同时借鉴对应产业生态内外生系统的划分[④],本文认为制造业内融合发展指的是制造业内智能化与绿色化迭代升级为融合化的发展,其形成逻辑是制造业智能化与制造业绿色化的融合,是技术边界与价值理念边界的纵向协同,突破制造业生态内生边界,有助于单一产业升级。制造业间融合发展指的是已有制造业间不同阶段的融合、制造业智能化催生得到的新兴产业[⑤]与已有制造业之间不同阶段的融合、不同新兴产业之间不同阶段的融合发展。其形成逻辑一是平行制造业智能化与平行制造业绿色化的融合,是技术边界与价值理念边界横向协同;二是平行制造业或新兴产业智能化、平行制造业绿色化与平行制造业融合化的融合,是技术边界、价值理念边界与制造业生态内生边界的横向协同,突破制造业生态外生边界,有助于多个产业协同和新型产业生成。制造业融合化实现的是高层级经济效益和环境效益与量质型社会效益的提升,是现代化产业体系迈向高级发展形态的集中体现。所以本文最终认为制造业融合化是以行业内技术、产品与服务的纵向集成为核心路径,以跨产业平台与生态的横向协同为协同路径,系统突破组织固有的内生边界与产业传统的外生边界,从而在经济效益、环境效益与社会效益三个层面实现高层级价值创造的范式。

(二)产业—生态共演机制

在明晰制造业智能化、绿色化和融合化的内涵之后,为探究制造业“三化”之间的互动机制,本文将依据产业—生态共演机制对制造业“三化”之间的互动机制进行拓展。产业—生态共演机制本

①袁朋伟,李娇,董晓庆:《共同股权网络下企业ESG表现同群效应研究》,《贵州财经大学学报》,2025年第4期;戴翔,杨双至:《数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型》,《中国工业经济》,2022年第9期。

②李旭辉,陈梦伟,朱启贵:《中国农业数字化绿色化协同发展的时空格局及收敛性分析》,《中国软科学》,2024年第8期。

③姜长云:《我国产业融合态势、问题与“十五五”发展思路》,《经济纵横》,2025年第6期。

④顾江,张苏缘,刘柏阳:《中国式现代化背景下数字文化产业生态研究》,《福建论坛》(人文社会科学版),2024年第2期。

⑤李晓华:《全球工业互联网发展比较》,《甘肃社会科学》,2020年第6期。

质上是经济系统与生态系统之间双向反馈所驱动的自适应过程：经济活动持续影响生态系统状态，而生态约束反向塑造产业的技术路径与组织形式。生态产业化与产业生态化正是这一自适应过程的两类典型体现。生态产业化主要是推动生态要素向产业要素流通、生态价值向经济价值转化，实现要素重组式经济效益增加。产业生态化主要是对产业系统进行彻底的绿色升级，在特定区域内实现产业、社会与生态的和谐共生，实现系统重构式经济效益和环境效益的增加。生态产业化与产业生态化虽然概念迥异，但其实质都是通过资源的循环高效利用，追求经济、社会与生态效益的协同增益，形成一个协同共进的有机系统。在此系统中，二者双向赋能：生态产业化作为牵引，为产业生态化创造市场与资源；产业生态化作为支撑，为生态产业化整合技术与产业链。

在产业—生态共演机制中，生态产业化与制造业数智化相对应，二者均聚焦于经济效益的提升；产业生态化则与制造业绿色化相呼应，二者共同侧重于实现经济效益与环境效益的双重提升。制造业数智化和绿色化的核心区别主要体现在两方面：一是制造业绿色化明确包含环境效益的提升，而制造业数智化主要聚焦于经济效益；二是制造业数智化侧重数量型社会效益，而制造业绿色化更关注质量型社会效益。因而，基于产业—生态共演机制中生态产业化与产业生态化的互动关系，本文认为制造业“三化”的理论互动模式是通过技术要素与价值偏好要素的深度融合，共同驱动制造业生态系统实现迭代升级。其实践互动模式一方面表现为制造业数智化以其技术能力支撑制造业绿色化，使其能以更高效率开展绿色生产，从而强化数量型社会效益；制造业绿色化以其环境价值导向为制造业融合化生态系统的发展提供方向引导。另一方面表现为制造业数智化和绿色化分别从技术与方向双重维度赋能融合化，二者基于理论模式中的要素融合，共同推动形成制造业融合化的新生态系统。制造业“三化”的理论与实践模式中的互动结果均实现经济效益、环境效益和社会效益的全面提升。

（三）制造业“三化”互动机制

在依据产业—生态共演机制对制造业“三化”互动模式进行简单阐释后，本文将从理论与实践两个角度详细阐述制造业“三化”互动机制。本文认为制造业“三化”的理论互动机制源于制造业“三化”互动路径与互动产业的联动，包括纵向互动机制、横向互动机制和纵横向互动机制。其中，互动路径包括纵向三化发展[①]、横向三化发展和纵横向三化发展，互动产业包括纵向垂直制造业、横向平行制造业和纵横向混合制造业。纵向三化发展指智能化、绿色化与融合化的迭代升级历程，该过程发生技术边界与价值理念边界的纵向协同，突破制造业生态内生边界。横向三化发展指智能化、绿色化和融合化的融合过程，该过程实现产业间技术共享，发生技术边界与价值理念边界的横向协同和技术边界、价值理念边界与制造业生态内生边界的横向协同，突破制造业生态外生边界。纵横向三化发展指智能化、绿色化与融合化的迭代升级历程和融合过程，该过程实现产业体系由平台化、网络化到生态化的演进，发生技术边界与价值理念边界的纵横向协同和技术边界、价值理念边界与制造业生态内生边界的横向协同，突破制造业生态内外生边界。

纵向互动机制源于纵向三化发展与纵向垂直制造业的联动，并具象化为制造业内部演化机制模型，该模型的驱动因素是技术边界的内生扩张，最终产出是单一产业升级。横向互动机制源于横向三化发展与横向平行制造业的联动，并具象化为跨产业融合模型，该模型的驱动因素是产业间资源耦合，最终产出是多个产业协同。纵横向互动机制包括三部分：一是源于纵向三化发展与横向平行制造业和纵横向混合制造业的联动，二是源于横向三化发展与纵横向混合制造业的联动，三是源于纵横向三化发展与纵向垂直制造业、横向平行制造业和纵横向混合制造业的联动，并具象化为产业生态创新理论模型，该模型的驱动因素是系统性产业网络演化，最终产出是单一产业升级、多个产业协同和新型产业生成。制造业内部演化机制模型、跨产业融合模型和产业生态创新理论模型共

①三化发展是制造业“三化”发展。

同组成制造业“三化”路径—产业矩阵模型,该模型是制造业“三化”的理论互动机制的具体体现,模型中要素联动结果如表1所示。值得注意的是,在理论机制中,制造业数智化是手段,制造业绿色化是目标,制造业融合化是最终目的。这三者之间的深层因果机制是一个以智能化为赋能引擎、以绿色化为价值导向、以融合化为演进模式的动态增强闭环。第一,智能化是同时驱动绿色化和融合化的核心技术手段。智能化通过智能传感器和AI算法,实现对能源消耗、物料流动、排放数据的实时监测与动态优化,直接达成节能降耗、精准减排,实现绿色化。智能化通过连接产品、打通数据平台,使企业能够实时感知产品运行状态、预测用户需求,实现融合化。第二,绿色化为智能化和融合化创造需求与空间。绿色化催生全新的服务业态,直接拓展融合化的边界与内涵,如为实现节能,催生合同能源管理服务。绿色化为实现全生命周期的碳足迹追踪、达成循环经济目标,会使企业必须依赖更强大的数据采集、追溯和分析能力,直接增加对智能化系统深度投资。第三,融合化为智能化和绿色化提供落地场景与持续动力。融合化要求企业承诺为客户提供设备无忧运营,就必须拥有对该设备极其深入的预测、诊断和远程优化能力,这倒逼企业在智能化上进行更极致、更持续的投资。融合化要求制造商对产品的全生命周期负责,这使其有内在动力从设计源头就考虑产品的易拆解、可回收和长寿命,从而将绿色化从外部成本内化为企业核心竞争力和利润来源。

表1　路径–产业矩阵模型中要素联动结果

结果		互动路径		
		纵向三化发展	横向三化发展	纵横向三化发展
互动产业	纵向垂直制造业	单一产业升级	–	单一产业升级
	横向平行制造业	单一产业升级	多个产业协同	单一产业升级 多个产业协同
	纵横向混合制造业	单一产业升级	多个产业协同	新型产业生成

本文认为制造业“三化”的实践互动机制是通过工业互联网平台、垂直领域大模型、生产性服务业和科技金融四大领域协同实现。四者协同构成一个有机复杂系统,作用逻辑是数据驱动智能,智能赋能服务,服务创造价值,价值吸引金融,金融反哺技术与数据。工业互联网平台领域提供制造业“三化”互动行为发生的统一数据空间和基础规则,通过泛在连接与数据聚合,实现全局状态的实时感知,目的在于感知数据。垂直领域大模型可以提供制造业“三化”互动所需的核心知识与优化策略,通过对多源异构数据的深度解析与建模,完成知识提炼、态势研判与优化决策,目的在于智能决策。生产性服务业领域是制造业“三化”行为的最终执行者和价值实现者,将智能决策转化为具体的专业化服务与创新解决方案,实现价值的最终落地与增值,目的在于精准执行。科技金融领域用于评估、定价并激励良性互动,惩罚低效行为,通过数据驱动的资本流动与风险计量,为系统持续注入动力并调节其演化节奏与方向,目的在于持续优化。其中工业互联网平台领域与产业链协同搭配使用。工业互联网平台领域包括单一工业互联网平台、多个工业互联网平台和全域工业互联网平台,分别对应理论机制中的纵向互动机制、横向互动机制和纵横向互动机制。工业互联网平台由四层架构构成[①],分别是数据采集层、基础设施层(IaaS)、平台层(PaaS)、应用层(SaaS)。平台层(PaaS)是应用全生命周期服务环境工具,包括工业微服务库、IT微服务库、工业大数据管理和开放资源接入与管理。各互联网平台的构建基于平台层的工业微服务库和IT微服务库。产业链协同包括纵向协同、横向协同和纵横向协同。单一工业互联网平台代表垂直制造业智能化、绿色化、融合化的集成平台,具体操作实现是采用纵向产业链协同完成。纵向产业链协同是利用数字技术对线性价值链进行一

①李燕:《工业互联网平台发展的制约因素与推进策略》,《改革》,2019年第10期。

体化整合和优化，主要是打破上下游企业间的组织壁垒和信息隔阂，实现从“链式”的逐级传递，向“一体化”的同步运作转变，是“线”级协同。多个工业互联网平台代表平行制造业之间智能化、绿色化、融合化的集成平台，具体操作实现是采用横向产业链协同完成的。横向产业链协同是企业间将内部冗余的或特定的资源与能力进行社会化重组和价值重释，从而创造出在传统纵向链条中无法实现的新效率、新业务与新价值，是“面”级协同。全域工业互联网平台代表混合制造业之间智能化、绿色化、融合化的集成平台，具体操作实现是采用纵横向产业链协同。纵横向产业链协同中企业是动态网络中的一个节点，既能从纵向深耕中获取效率，又能从横向拓展中获取弹性与创新动力，是“网”级协同。将工业互联网平台与产业链协同结合，可以实现相关核心技术重塑制造业产业组织形态。在实践互动机制中，工业互联网平台是感知系统，垂直领域大模型是智能中枢，生产性服务业是执行网络，科技金融是资源配置循环系统，四者共同作用使得产业变革成为可能。

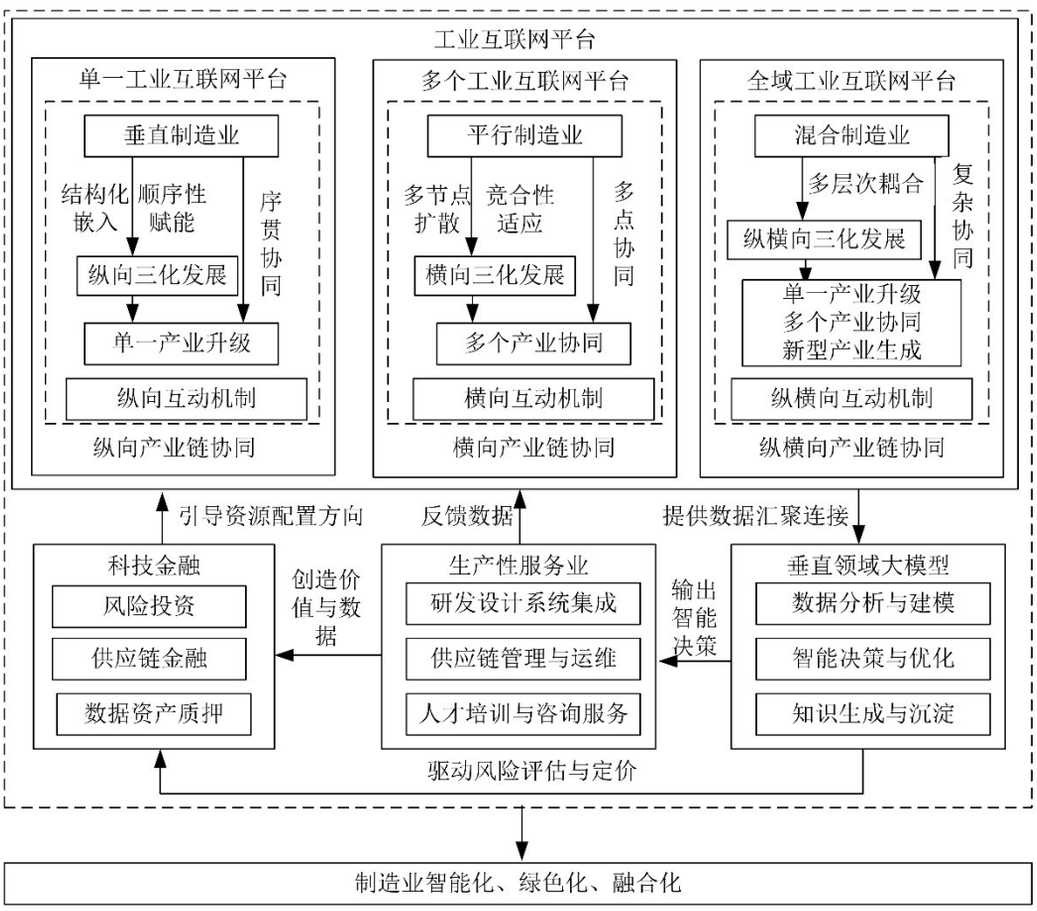


图1　制造业智能化、绿色化、融合化的理论与实践互动机制

三、制造业智能化、绿色化、融合化发展的路径

推动制造业向智能化、绿色化、融合化发展，是一个涉及技术革新、制度重构与产业生态演进的系统性工程。当前，制造业“三化”进程的共同深层矛盾在于前沿技术的快速迭代、复杂价值的内部需求与现有制度规则、组织能力及市场激励之间的结构性错配与响应迟滞。因此，为突破发展堵点并构建有效路径，必须摒弃单点突破的线性思维，转向系统性改革。本文将分别阐述智能化、绿色化、融合化的具体发展路径，对应路径分析均遵循同一深层逻辑：首先，精准识别其核心矛盾；其次，

围绕该矛盾,设计一套从政策供给、技术供给到组织治理的解决方案;最终,旨在形成能够激发内生活力、实现正向循环的驱动体系。由于制造业融合化包含由制造业数智化和制造业绿色化融合发展而来的部分,因而制造业融合化的发展路径需要借鉴制造业“三化”互动机制进行设计。然而为实现制造业融合化的全面发展,需要制造业数智化与制造业绿色化的健康稳健发展,所以需要分别明晰制造业数智化与制造业绿色化的具体发展路径。

(一)制造业智能化发展路径

1. 制造业智能化发展的堵点

当前,制造业智能化的核心矛盾在于技术系统快速迭代与组织制度缓慢适应之间的结构性脱节,导致转型受阻。基于前文对制造业数智化内涵的界定,本文从后端、中端、前端的架构映射视角,对制造业数智化发展过程中存在的主要问题进行分析。其中,后端对应制度供给与规则基础,主要体现为政策、监管与标准体系;中端对应技术供给与系统集成能力,强调关键技术开发、融合及其工程化能力;前端对应场景牵引与价值实现,侧重数智技术在制造环节中的应用成效与产出。该架构的运行逻辑在于:后端作为约束层为中端能力层设定制度边界和运行规则,中端能力层通过技术供给与系统集成将制度约束转化为现实生产力,形成前端的结果层;而前端的应用成效与价值反馈又会反向作用于后端与中端,推动制度优化与能力升级,从而形成动态演进的闭环。在此基础上,本文认为当前制造业数智化主要面临政策供给、技术供给和组织治理三个维度的堵点。

第一,在政策供给维度存在结构性缺失与协同不足的堵点。一方面,支撑制造业数智化转型的基础性政策供给尚未形成体系:一是制度环境中缺乏长期稳定的立法保障与跨部门协同机制,导致企业面临政策预期不稳、合规成本高的问题;二是人才政策在培养导向与产业需求之间存在脱节,加剧了总量短缺与技能错配;三是关键技术攻关的政策支持碎片化,未能形成从研发到产业化的全链条政策护航,制约了自主创新能力的系统提升。这三重政策短板共同削弱了企业构建可持续智能制造体系的内生动力与应对实际问题的制度韧性。另一方面,区域协调与全球化对接的政

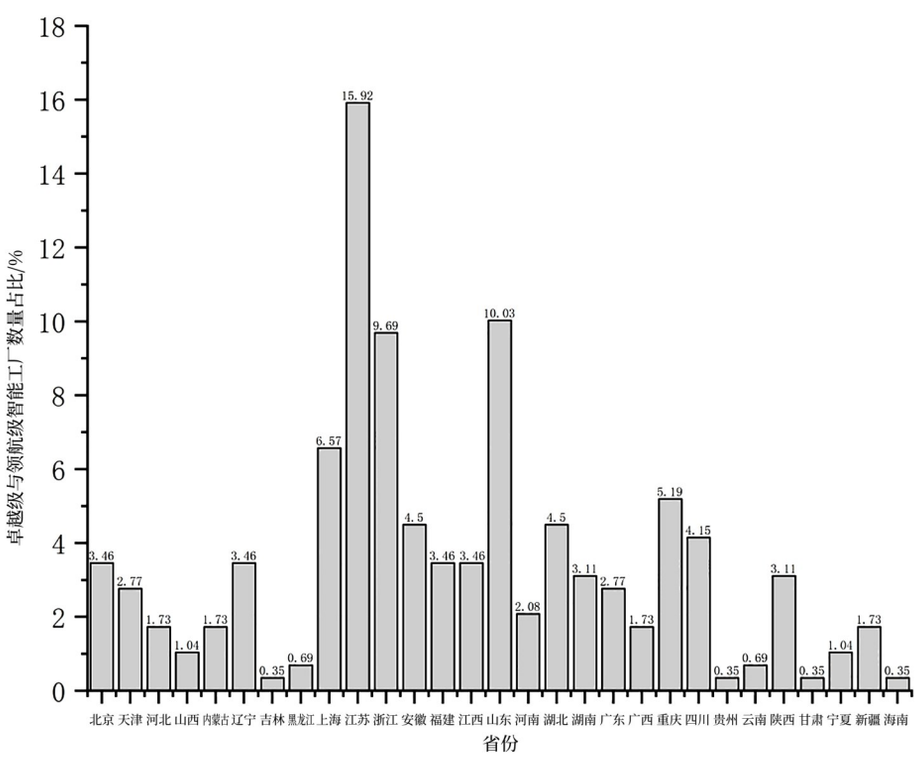


图2　2025年卓越级与领航级智能工厂数量占比

策工具供给明显滞后：一是缺乏针对不同发展梯度的区域性差异化支持政策，未能有效缓解智能工厂建设在东西部之间的显著落差；二是监管框架仍以传统业态为主，尚未建立起适配新技术、新业态发展的包容审慎监管机制；三是在国际标准互认、数据跨境流动等关键规则领域，国内政策对接与话语权建设进度迟缓，制约了制造业数智化在区域协同与全球价值链中的深度整合。如图2所示，2025年各省份智能工厂建设水平呈现显著两极分化，这不仅是资源与能力差距的体现，更深层次反映了当前政策在统筹区域均衡、引导资源流动方面存在的系统性不足。

第二，在技术供给维度存在中端技术融合能力薄弱、前端场景落地受阻和系统集成能力不足的堵点。一是中端技术融合能力仍显薄弱，尽管后端制度环境已初步建立，但人工智能、工业互联网等关键技术的协同整合仍有待深化，从而制约制造业数智化从局部突破向系统性升级。二是前端场景落地与成果规模化输出受阻，智能技术与制造全流程的深度融合不畅，致使智能工厂等先进载体建设进程缓慢，限制制造业数智化成果的体系化扩展与转型向纵深推进。三是技术体系无法实现复杂集成，还仅停留在技术堆砌层面，提高了制造业数智化维护成本且无法支撑相应能力的持续优化。

第三，在组织治理维度存在组织治理与数据治理能力不足的堵点。一方面组织架构与文化未能与技术升级同步变革，部门壁垒会使数据与流程难以贯通，从而导致制造业数智化转型推进受阻。另一方面数据治理体系尚不完善，表现为标准缺失、质量管控薄弱等问题，在此基础上的智能决策可能因数据缺陷而引发生产与经营风险。

2. 制造业智能化发展的措施

针对上述堵点，本文提出以下相应措施促使制造业智能化发展，措施的核心在于构建一个制度奠基、技术攻坚、组织适配协同驱动的系统性突破框架，以破解技术与制度脱节，推动智能化从局部应用向体系化生态演进。

第一，在政策供给维度，要破解结构性缺失与协同不足，构建逻辑递进的协同治理体系。在基础性制度体系建设层面，由国家发展和改革委员会、工业和信息化部牵头，联合全国人大常委会法工委及相关部委，通过建立部际联席会议制度、完善顶层设计与政策工具箱等方式，构建稳定的法治与政策环境，降低企业长期投资的政策风险和不确定性，从而形成重点领域制度供给持续完善、企业转型预期稳固的治理闭环。

在技术攻坚层面，由科技部与工信部门主导，协同国家级创新平台与行业领军企业，通过实施重大科技专项、建设创新中心及推广开源社区，着力突破工业软件、智能装备等核心环节，进而降低创新门槛、强化自主可控能力，从而实现关键技术自主化与国产装备市场占有率的提升。

在人才支撑层面，由教育部、工信部及人社部协同，通过升级“卓越工程师”计划、建立校企双聘制度、完善技能等级贯通体系，构建产教融合育人模式，进而破解人才结构性短缺、加强工程实践与数据智能复合能力培养，从而在短期内提升重点领域人才供给的匹配度与充足性。

在区域差异化政策层面，由国家发展改革委、工业和信息化部与地方省级政府协同，通过设立差异化财政支持专项、建设区域级工业互联网赋能中心等方式，精准适配区域资源禀赋与发展阶段，缩小区域间数智化发展的差距，从而在形成东部引领、中部提升、西部追赶的区域协同治理闭环。

在监管适配层面，由国家市场监督管理总局、网信办及行业主管部门协同，通过开展监管沙盒试点、搭建实时风险预警平台，并实施弹性与分类监管，进而为创新提供可控试错空间，从而在短期内形成新业态监管范式，缩短创新产品平均上市周期。

在国际协同层面，由商务部、国家标准委及外交部协同，通过深度参与并主导国际标准制定、推动中国标准海外示范应用，促进规则对接与标准输出，进而提升我国在全球产业治理中的话语权，从而在短期内实现牵头制定关键国际标准、推动核心企业完成国际合规对接的目标。该体系通过制度奠基、技术突破、人才驱动、区域政策、监管包容和国际引领的协同作用机制，旨在扫清制造

业数智化在政策供给维度的关键障碍,为其从本土创新向全球竞争的系统性跃迁提供全链条支撑。

第二,在技术供给维度,要突破中端技术融合能力薄弱、前端场景落地受阻和系统集成瓶颈,构建统筹推进的突破体系。在中端技术融合能力提升层面,由工业和信息化部、科学技术部牵头,联合国家发展改革委及国家级制造业创新中心,通过制定跨技术领域集成接口标准与测试规范和开展人工智能+工业互联网融合应用场景揭榜挂帅试点,打通关键技术在协议、数据、算法层面的操作瓶颈,进而实现重点行业技术融合成熟度显著提升。

在场景规模化落地层面,由国家发展改革委、工业和信息化部协同地方相关部门,通过分行业发布智能工厂参考架构与技术标准、建设工业互联网平台、设立专项升级基金等措施,以标准引领、平台赋能、金融助力三位一体模式加速基于数字孪生等技术的先进实践在全流程的复制推广,进而推动企业开展系统性智能化改造,从而提升重点产业智能化渗透率。

在技术系统集成架构重构层面,由工业和信息化部、科技部主导,依托企业联盟及集成商,通过开展架构成熟度评估、建设通用能力组件库及推广工业互联网开放生态,推动技术体系向平台化、模块化演进,进而保障系统可持续演化,形成模块化解决方案集合,培育水平集成服务商,提升重点行业集成效率,降低成本并缩短迭代周期。该体系通过技术融合、规模复制和集成架构的路径,旨在系统性打通制造业数智化在技术供给维度的堵点,为制造业数智化向系统性、深层次升级提供坚实支撑。

第三,在组织治理维度,要系统提升组织治理与数据治理能力,构建深度融合的治理框架。在组织治理能力层面,由工业和信息化部、国资委牵头,联合重点企业及行业协会,通过制定组织变革指南、推广数据驱动考核体系及开展数字化领导力培训,推动组织向网络化转型,进而打破部门壁垒、激发内生动力,从而短期内实现骨干企业组织模式系统性重构与跨部门协同效率的提升。

在数据治理能力层面,由国家标准化管理委员会、网信办及行业主管部门协同,通过发布数据分类分级规范、建设质量监测平台、推广资产化管理模式,建立标准化数据治理体系,进而统一数据标准并强化全生命周期质量管理,从而主导制定核心数据标准,提升关键业务数据质量达标率。该体系通过组织适配和数据赋能的闭环联动,旨在系统性破除制约制造业数智化在组织治理维度纵深发展的内在约束,为企业构建数字能力提供根本保障。

通过上述制度奠基、技术攻坚、组织适配三重措施的协同推进,能够有效缓解技术与制度的脱节矛盾,推动制造业智能化从标杆工厂的点状突破向产业链网络化协同演进,最终构建起可持续、自适应、广泛渗透的智能制造生态体系。

(二)制造业绿色化发展路径

1. 制造业绿色化发展的堵点

制造业绿色化的根本障碍在于“绿色溢价”未能有效内化为企业收益,导致陷入市场激励失灵与长期投资能力不足的循环困境。基于前文,本文从技术解耦与治理耦合的框架映射视角,对制造业绿色化发展过程中存在的主要堵点进行分析。其中,技术解耦对应转型方案突破与系统重构能力,主要表现为通过能源、材料及效率创新将生产活动从资源消耗与污染排放的传统路径中分离的工程实践。治理耦合对应规则建构与价值整合能力,其核心在于通过制度设计与机制创新,将外部成本内部化,进而推动形成协同可持续的产业生态规则体系。该框架的运行逻辑在于:技术解耦将治理约束转化为具体改造行动与绿色产出。治理耦合为技术解耦设定边界、提供信号并降低制度成本;转型成果的经济特性助推治理机制的迭代与升级,最终实现产业系统的绿色跃迁。在此基础上,本文认为当前制造业绿色化主要面临政策供给、技术供给和组织治理三个维度的堵点。

第一,在政策供给维度存在未能有效引导和纠正资本供给的结构性失衡与绿色制造标准政策执行效能不足的堵点。一方面是资本供给的短期化、碎片化模式与绿色转型所需的长期性、系统性投资之间形成尖锐矛盾,现有以单点补贴为主的激励手段难以支撑企业在技术迭代、流程再造及全生命周期管理中的持续投入,导致其深度绿色化转型的内生动力不足。另一方面是绿色制造标

准政策体系在执行层面存在口径分散和衔接不畅等突出问题，此类执行偏差造成企业对绿色化目标与路径的认知不统一、预期不稳定，进而阻碍产业整体向高阶绿色制造形态演进。

第二，在技术供给维度存在技术解耦不彻底和治理耦合环节技术更新滞后的堵点。一方面是在生产环节，高端绿色清洁技术的研发与应用未能有效实现与传统高碳路径的解耦，其迭代缓慢与推广不足导致资源利用效率提升陷入平台期，环境负荷居高不下，制造业绿色转型面临显著的碳锁定风险。另一方面是治理耦合环节中关于污染控制、资源回收等阶段的技术更新滞后，无法与生产设计、供应链管理形成深度耦合，导致废弃物管理与循环利用难以实现全链条贯通。

第三，在组织治理维度存在战略短视和能力缺口的堵点。一方面是企业在绿色投资上普遍存在风险规避倾向，由于回报周期长，容易导致投资节奏失衡或陷入路径锁定，削弱其开展前瞻性绿色创新的内生动力。另一方面是碳排放管理面临供应链复杂嵌入的挑战，由于企业碳足迹占比高、数据基础薄弱，使企业在碳核算、溯源与减排协同方面能力不足，进一步加剧了绿色转型的整体不确定性与执行阻力。例如，在钢铁行业，尽管低碳冶炼技术已取得突破，但由于初始投资大、投资回收期长，企业普遍缺乏大规模应用的动力，导致行业平均吨钢碳排放仍处于高位[①]，形成典型的“碳锁定”困境。

2. 制造业绿色化发展的措施

针对上述堵点，本文提出以下相应措施促使制造业绿色化发展，措施的关键在于实施激励约束双向强化和技术治理一体协同的组合策略，旨在将外部绿色压力转化为企业内在创新动力，系统破解激励失灵与能力短板。

第一，在政策供给维度，要破解资本供给结构失衡与绿色标准政策执行效果欠佳，构建协同的政策支撑体系。在资本供给优化层面，由国家发展改革委、财政部及中国人民银行牵头，协同政策性金融机构与产业投资基金，通过设立绿色转型专项基金、发行中长期绿色债券、实施阶梯式补贴及建立风险补偿机制，构建长期稳定、风险共担的绿色金融支持体系，进而匹配绿色转型的长期投入需求，引导社会资本投入并提升绿色技术研发投资占比。

在政策标准执行强化层面，由国家市场监督管理总局、工业和信息化部及生态环境部协同，通过整合现行标准、建设绿色制造数字管理平台、推行分级标识与信用关联机制，构建统一协同、数字赋能的标准实施体系，进而提升标准的清晰度、约束力与执行效能，从而实现重点行业绿色工厂标准全覆盖，提高企业主动执行率。该体系通过资本精准引导撬动转型投入和标准刚性约束明晰转型路径的协同作用，旨在系统纠正制造业绿色化在政策供给维度与规范层面的双重偏差，为制造业向高阶绿色形态迈进提供稳定可预期的制度环境。

第二，在技术供给维度，要破除技术解耦不充分与治理耦合环节技术更新滞后，构建协同驱动的技术创新体系。在生产环节技术解耦层面，由科技部、工业和信息化部牵头，联合国家级科研机构与龙头企业，通过突破变革性绿色清洁技术、布局零碳工业流程再造项目、建设绿色技术中试平台，推动基础研究与场景应用双向拉动，进而加速技术迭代、降低替代成本，从而实现关键低碳技术的规模化应用与重点行业单位产品碳排放强度的下降。

在治理耦合环节技术更新层面，由工业和信息化部、科学技术部牵头，联合国家级制造业创新平台与行业领军企业，通过建设工业人工智能开放平台、研发智能感知与协同控制算法，推动数字孪生和跨域互联等关键技术发展，进而实现研发设计、生产制造、运营管理全链条的数据贯通与智能协同，从而推动重点行业智能制造关键技术自主化率提升。该体系通过突破性技术驱动根本性替代与系统性技术更新实现全域化增效的协同路径，旨在打破制造业绿色化在技术供给维度上的碳锁定风险与碎片化治理困局，为制造业绿色化向系统化、高阶化演进提供坚实的技术支撑。

第三，在组织治理维度，要化解战略短视与能力短板，构建相互支撑的组织赋能体系。在绿色

①任继球：《“双碳”目标下钢铁产业压力挑战与发展建议》，《宏观经济管理》，2023年第3期。

投资战略引导层面,由国资委、工业和信息化部牵头,联合金融机构与行业组织,通过推行绿色项目收益保险和完善相关税收抵免政策,构建多层次风险缓释与收益保障机制,进而降低长期绿色投资的不确定性,从而提升制造业绿色投资占比,降低绿色创新项目融资成本。

在碳管理能力建设层面,由生态环境部、商务部主导,协同重点企业与第三方机构,通过发布行业碳足迹核算指南、建设国家碳足迹数据库与追溯平台、将碳绩效纳入采购与供应链管理标准,构建供应链碳管理体系,进而破解企业碳足迹管理难题,从而推动核心企业碳数据互联互通,降低重点行业供应链平均碳强度。该体系通过市场化机制稳定绿色投资预期和标准化工具破解碳管理复杂瓶颈的协同路径,旨在扭转制造业绿色化在组织治理中企业绿色转型的短视行为与能力困境,为制造业绿色化向高阶化迈进提供坚实的组织保障与治理基础。

(三)制造业融合化发展路径

1. 制造业融合化发展的堵点

制造业融合化的核心挑战是产业边界刚性约束与融合创新所需的跨域协同规则、可信数据基础及共生激励机制严重缺失之间的深层矛盾。基于前文对制造业融合化内涵的界定及制造业"三化"互动机制的探讨,本文认为当前制造业融合化主要面临政策供给、技术供给和组织治理三个维度的堵点。

第一,在政策供给维度存在政策规则体系供给不完善的堵点。一方面是统一的技术融合衡量标准与成熟度评估体系尚未建立,企业因缺乏明确的评价尺度和规则预期,在技术路线选择、集成投入与跨主体协作上难以达成共识,加剧了互操作性壁垒,推高了协作成本,制约融合化向规模化扩散升级。另一方面是跨行业、跨环节的互操作性规范与接口标准体系缺失,导致不同架构系统间难以实现数据贯通与能力复用,使系统集成长期陷于"拼接化"困境,无法实现真正的闭环重构。这些都反映出,当前政策在提供融合发展的"通用语言"和"连接规则"方面仍显不足。

第二,在技术供给维度存在关键技术供给的传导性失灵的堵点。一方面是在治理与供给的传导路径中,由于数据可信规则与标准化体系缺位,市场对融合性治理技术的需求尚未形成明确信号与规模效应,导致技术供给环节出现研发投入分散、标准化工具供给滞后等结构性响应失灵,难以形成支撑跨域数据流通的共性技术基础。如纵横向互动机制中存在现有产业与新兴产业以及新兴产业间无法融合问题的原因之一在于技术底层架构异构导致数据无法流通。另一方面,在供给与融合的传导路径中,缺乏跨行业可复用的代码集成工具和开放授权的协议转换框架,使得当前的技术融合长期受限于基础连通层面,难以进入深度集成阶段,无法支撑智能体协同演进,制约产业链整体技术架构演进。

第三,在组织治理维度存在协同治理机制缺位、激励体系不健全与融合深化支撑不足的堵点。一是在协同治理层面,跨部门、跨主体、跨区域的权威协调机制与标准化协作流程尚未建立,缺乏对数据互通、资源调度与行动同步的有效规则约束,导致协作成本高,难以支撑链式与网络化协同的规模化扩展,无法为融合深化提供稳定的组织基础。二是在激励设计层面,现有政策工具未能构建与融合深度、协作绩效及风险承担相匹配的利益分配与补偿机制,企业在缺乏长期收益预期的情况下,倾向于采取短期的合作策略,此举不仅抑制其参与实质性重构的动力,而且导致试点成果因缺乏市场化推广激励而难以实现生态化扩散。三是在深化落地层面,由于协同框架不稳定与激励导向不明确,融合实践易陷入形式化困境,难以触及流程再造、组织变革与商业模式创新等深层次转型,进而削弱融合成果的价值兑现能力。

2. 制造业融合化发展的措施

针对上述堵点,本文提出以下相应措施促使制造业融合化发展,措施主要遵循规则先行、技术筑基、机制护航的递进逻辑,通过构建可互操作的制度基础与可信赖的协同网络,催化产业边界溶解与价值网络重构。

第一,在政策供给维度,要化解政策规则体系不完善瓶颈,构建双轮驱动的政策体系。在标准

引领层面，由国家标准化管理委员会、工业和信息化部牵头，协同重点行业组织与龙头企业，通过制定技术融合能力成熟度国家标准、分行业开展试点评估与标杆遴选、建立评估结果与政策联动机制，构建统一的评估与认证体系，进而为企业技术路线选择提供稳定预期，从而推动骨干企业完成标准符合性评估，降低重点领域技术融合项目的平均协作成本。

在接口互通层面，由工业和信息化部、科技部主导，依托制造业创新中心与开源社区，通过成立跨行业标准工作组、建设标准测试验证平台、开展“标准互认”应用示范，共同研制并推广互操作性规范与数据接口标准，进而以规范解耦促进系统耦合、为数据贯通与能力复用提供规则，从而形成覆盖智能制造等关键领域的互操作标准簇，缩短跨系统集成项目周期。该体系旨在系统性破除制约制造业融合化在政策供给维度上的规则性障碍，为制造业融合化从局部连接向全局重构演进提供制度基础。

第二，在技术供给维度，要聚焦关键技术供给传导失灵，构建梯次推进的技术攻坚体系。在可信数据技术供给层面，由科技部、国家发展改革委牵头，依托国家实验室及领军企业，通过设立“数据可信流通”重大专项、建设国家级验证平台、制定核心组件开源协议，着力攻关基础技术，进而研发共性基础软件与标准化工具包，为跨域数据流通提供可信技术底座，从而突破关键底层技术，降低跨域数据协同场景的技术成本。

在融合公共技术供给层面，由工业和信息化部、科技部主导，协同制造业创新中心与产业链链主，通过实施融合技术“揭榜挂帅”工程、建设共性技术模块仓库、开展集成应用示范，进而以标准化可复用技术模块降低融合复杂性与试错成本，从而形成关键领域的标准化集成方案，缩短跨系统融合项目开发周期。该体系通过以可信技术筑基稳固治理需求和以融合技术赋能降低重构门槛的协同路径，系统性打通制造业融合化在技术供给维度上从治理需求到技术供给、再从技术供给到深度融合的双重传导阻滞，为制造业融合化从接口适配迈向系统重构提供可持续的技术支撑。

第三，在组织治理维度，要化解组织治理三重短板，构建逐级传导的治理体系。在协同机制构建层面，由国家发展改革委、工业和信息化部牵头，联合重点行业协会与链主企业，通过发布协同操作指南、建设跨域资源调度平台、试点“联合规划—同步实施”协作模式，建立“线—面”级与“线—面—网”级跨区域、跨产业的融合协调机制，前者为突破制造业生态内生边界提供操作基础，后者则为应对外生边界拓展协同能力，进而降低制度性交易成本与协作摩擦，从而在长三角等区域形成跨省协同示范，缩短重点产业链协同项目的决策周期。

在激励机制创新层面，由财政部、国资委、市场监管总局协同，通过设立融合化专项奖励基金、推行税收优惠与绩效挂钩机制、建立跨界协作保险产品池，构建投入共担、收益共享、风险补偿的立体激励模型，进而稳定企业长期合作预期，从而引导社会资本形成融合化投资基金，提升企业持续性协作投入占比。

在深化支撑机制构建层面，由工业和信息化部、国家发展改革委牵头，联合重点行业协会与产业链链主企业，通过制定融合化成熟度与商业价值评估标准、建设深度融合解决方案资源池与赋能平台、开展流程再造与模式创新示范试点，构建全链条深度转型支撑体系，进而帮助企业对接转型资源和降低重构风险，从而推动融合实践从接口连通迈向业务流程再造、组织形态创新与商业价值跃迁，实现融合成果从形式协作到系统增效的实质性突破。该体系通过协同机制奠基、激励机制驱动和深化机制实现的递进传导，旨在系统性打破制造业融合化在组织治理维度上的阻碍，为制造业融合化从点状协作迈向网络生态提供坚实可操作的组织保障。

四、促进制造业智能化、绿色化、融合化发展的建议

基于前文对制造业“三化”发展机制的系统辨析与发展路径的堵点剖析，本文旨在围绕构建系

统政策体系、突破核心技术瓶颈、培育复合人才梯队和布局新型基础设施四个支柱展开对促进制造业“三化”全面发展的探讨。其中,政策体系是引导与保障,核心技术是驱动内核,人才梯队是能动主体,新型设施是承载基座。通过四维协同发力,旨在构建一个能够激发市场内生动力、有效配置要素资源、动态适应技术变革的制造业“三化”发展生态系统,最终推动中国制造业实现从规模优势向智能驱动效率变革、绿色重塑价值内核和融合重构产业生态的质量优势的根本性跃迁,为“十五五”时期构建自主可控、韧性强劲的现代化产业体系提供坚实支撑。

(一)构建系统政策体系,强化宏观引导与制度保障

制造业“三化”发展需要建立多层次政策体系。在顶层设计层面。一是差异化政策。一方面,制定制造业智能化、绿色化、融合化发展专项规划,明确各阶段发展目标、重点产业和技术路线图。另一方面,政策体系要体现差异化支持原则,根据区域差异、行业特性和企业规模制定分类指导政策。就区域差异而言,在长三角和粤港澳大湾区构建创新策源地政策,定义未来技术标准和商业模式,实现制造业“三化”并进引领。在中部省会城市构建转型升级核心区政策,承接创新成果、打造先进制造集群,实现制造业“三化”深度融合。在西北老工业基地和资源型地区构建特色追赶区政策,依托特色资源实现价值跃迁,探索特色化路径。就行业特性而言,对钢铁等流程行业,注重工艺与材料创新,强化过程控制与模型优化,注重能耗控制。对汽车等离散行业,注重产品和核心部件创新,侧重生产设备网络化,提升单元效率和柔性,开展全生命周期管理。就企业规模而言,对龙头企业而言,要支持其承担重大科技项目;对中小企业而言,要构建梯度培育体系。二是衡量标准与试点。一方面,建立覆盖制造业“三化”的统一标准框架,包括智能制造能力成熟度评价体系、产品碳足迹核算标准、跨行业数据接口规范等;另一方面,培育零碳工厂、智能协同工厂、跨界融合平台三类标杆,通过总结推广最佳实践,形成可复制的制度与模式。在末端落实层面。一是创新融合。加大未知技术边界融合投入,同时设立制造业“三化融合创新试验区”,为政策创新提供试验空间。二是部门协同。一方面,建立由工业和信息化部牵头、多部门协同的工作机制,为实现制造业“三化”提供路径支撑;另一方面,鼓励开展跨企业、跨区域的协同技术改造示范,有助于将先进智能化生产和绿色化管理标准沿产业链扩散,优化整个产业生态资源配置。三是激励政策。构建多元化支持工具体系,对开展智能化改造、绿色低碳转型、跨界融合成效显著的企业,实施梯度式资金补贴、税收减免、低息贷款等组合激励政策。在监管机制层面。一是包容审慎监管机制。对产业新形态采取包容审慎的监管态度,预留创新空间,同时守住安全与伦理底线。二是动态评估并调整政策实施效果。完善制造业“三化”发展水平的监测、评估和考核体系,基于数据实时跟踪政策效果,并动态调整优化。

(二)突破核心技术瓶颈,构建自主可控的支撑能力

技术突破是制造业“三化”发展的核心驱动力。在智能化领域,要重点攻克工业智能算法、高端工业软件、智能传感与执行系统等关键环节。特别是要突破工业操作系统、研发设计软件、生产管理软件的自主可控,推动制造系统实现从感知、决策到执行的全面智能化。建立智能制造核心装备与系统创新中心,加快技术成果的工程化、产业化。在绿色技术领域,要着力突破低碳零碳工艺流程,重点开发碳捕集利用、生物制造等颠覆性技术。建立重点行业绿色工艺库和最佳实践案例库,推动清洁能源替代与资源循环利用技术规模化应用。加强绿色材料研发,开发生物基材料、可降解材料等新型环保材料,从源头减少环境污染。在技术融合领域,要构建“智能+绿色”技术协同创新体系,推进数字孪生、智慧能源管理、产业链碳追踪等融合技术研发。建设跨行业技术创新联盟,促进不同领域技术的交叉融合和系统集成。建立制造业“三化”技术图谱,明确技术发展路径和突破重点,实现技术模块的互联互通与效能倍增。为突破智能化方面高端工业软件的自主可控能力不足、智能算力不足、高价值工业数据资产的系统性缺失等技术瓶颈,需要建立工业软件与算法研究院、工业智能实验室等新型研发机构。该类研发机构主要聚焦“人工智能+制造”前沿,开展算法原型验证与工程化研究。为突破绿色化方面零碳工业流程规模化应用路径的欠缺、高效碳捕集利用的成本效率瓶颈、产品全生命周

期碳排放管理技术在量化核算与动态优化环节的缺失等技术障碍，需要建立绿色低碳工艺创新中心、产品碳足迹核算与认证平台等新型研发机构。该类研发机构主要聚焦碳数据核算规则与数据库，服务供应链绿色管理。为突破融合化方面产业标准与协议互认的协同标准体系尚未建立、数据安全可信流通技术尚不成熟、复杂系统集成方法论的欠缺等技术壁垒，需要建立跨界融合创新中心、产业数据空间运营机构等新型研发机构。该类研发机构主要聚焦可信数据交换基础设施，促进数据要素安全流通与价值挖掘。新型研发机构作为技术突破的策源地，为确保其有效运转，需要建立政府引导、企业主导的现代化治理机制，组建风险共担的机构—企业—高校—资本创新联合体，采用市场化绩效评估，通过数字平台构建网络化协同生态，从而系统开展制造业“三化”技术攻关。

（三）培育复合人才梯队，夯实创新发展的人力基础

T型人才是制造业“三化”发展的重要内驱力。实施重点人才专项计划，设立“制造业卓越工程师计划”重点培养具备工艺知识、算法能力与低碳素养的复合型技术骨干人才。建立“智能制造首席专家”和“绿色制造领军人才”评审激励机制，对在制造业“三化”领域做出突出贡献的人才给予重点支持，建立制造业人才库，实现人才的精准识别和动态管理。完善终身技能提升机制，建立制造业技能图谱与岗位能力标准，依托数字平台开展精准培训，鼓励企业建立技能等级与薪酬晋升挂钩制度，激发员工持续学习与转型的动力。建立跨企业、跨区域的人才交流机制，促进人才资源的优化配置，并成立专项工作组与人才发展基金，形成部门协同、多元投入的保障体系，最终锻造支撑制造业高质量发展的核心人才引擎。

（四）布局新型基础设施，构建高效协同的支撑环境

新型基础设施是制造业“三化”发展的重要支撑。要加快建设工业数据流通与算力基础设施，构建国家工业大数据中心体系，建立数据可信共享与价值分配机制。建设工业互联网标识解析体系，实现全要素、全产业链、全价值链的互联互通。完善绿色能源与循环利用设施，加快建设工业园区光伏微电网、氢能供应网络、碳捕集封存设施。建立区域性再生资源交易平台与逆向物流体系，提升资源循环利用效率。推动工业园区循环化改造，建设能源梯级利用、废水集中处理等共享设施，提高资源利用效率。打造跨界融合服务平台，建设行业级工业互联网平台、制造业创新综合体，提供技术集成、标准验证、成果转化等一站式服务。建立制造业创新服务网络，整合研发设计、检验检测、知识产权等专业服务资源，降低企业融合创新门槛与风险。同时要加强基础设施的统筹规划和集约建设，避免重复投资和资源浪费，提高基础设施的利用效率。通过政策、技术、人才、设施的四维协同，制造业将形成“智能驱动效率变革、绿色重塑价值内核、融合重构产业生态”的新发展格局。

展望“十五五”，中国制造业将进入智能化、绿色化和融合化深度协同的新发展阶段，迫切需要建立以创新驱动、自主可控、韧性强劲为特征的现代化产业体系。在智能化方面，人工智能、工业互联网等数字技术将渗透至研发设计、生产制造、运营管理等全流程，推动制造业向自感知、自决策、自执行的高级形态演进。在绿色化方面，绿色化将贯穿产品全生命周期，通过清洁能源替代、循环经济体系建设等路径，实现经济效益与生态效益的有机统一。在融合化方面，融合化发展将打破产业边界，形成开放协同的产业生态。中国制造业不仅将在国内经济中发挥“压舱石”作用，更将在全球产业格局中重塑竞争优势，为全面建成制造强国、实现高质量发展提供坚实支撑。

[责任编辑：袁朋伟]