

工业数字化绿色化融合发展 白皮书 (2022 年)

中国信息通信研究院

2023年1月

版权声明

本白皮书版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。



前 言

全球气候环境不断恶化，严重威胁着人类社会的可持续发展。为了应对日益恶化的气候环境，各国政府开始关注工业经济低碳转型，绿色增长已成为全球经济竞争的制高点。与此同时，全球也在进行新一轮的科技革命，以大数据、云计算、人工智能等为代表的数字技术正在改变着全球经济，对人类社会产生了深远影响，但数字化不是独立存在的，其作用表现在为各行业的服务之中，并与各行业融合发展。

工业是立国之本、强国之基，同时也是能源资源消耗和碳排放重点领域，工业数字化绿色化融合发展是高质量发展的内在要求、必然趋势和必由之路。碳达峰碳中和“1+N”政策体系中明确提出要加快发展新一代信息技术等战略性新兴产业，推进工业领域数字化智能化绿色化融合发展。在数字技术蓬勃发展和工业绿色转型双重背景下，探究数绿融合发展的内涵、理论机制与实现路径，具有重要现实意义。绿色化是工业高质量发展的底色和重要目标，数字化则是重要方式和手段，利用数字技术打造“绿水青山”和“金山银山”，以工业文明助推生态文明建设。

本白皮书首次提出了工业数字化绿色化融合发展的内涵特征及其重要战略意义，梳理了国内外的探索和实践，提出融合发展的“四梁八柱”思路框架以及区域、行业、企业层面实施路径，并对未来走势进行了展望，最后给出了进一步推动深度融合发展的策略。

目 录

一、工业数绿融合发展的内涵和重要意义.....	1
（一）工业数绿融合发展的内涵	1
（二）工业数绿融合发展的特征	3
（三）工业数绿融合发展演进脉络	4
（四）工业数绿融合发展意义重大	6
二、工业数绿融合发展的国内外探索和实践.....	9
（一）欧盟：制定战略规划，引领数字和绿色双重转型	9
（二）英国：发挥技术优势，积极部署绿色工业革命	11
（三）美国：注重融合均衡，捍卫制造业综合实力高地	12
（四）日本：强调政策融合，推动数字赋能绿色发展	14
（五）中国：多措并举、多方发力，推动数绿深度融合	16
三、工业数绿融合发展的实施路径.....	21
（一）工业数绿融合总体思路框架	21
（二）区域：特色发展因地制宜	26
（三）行业：优化结构分业施策	29
（四）企业：实施智能绿色制造	33
四、工业数绿融合展望和推进策略.....	38
（一）融合发展未来展望	38
（二）夯实数字化基础水平	40
（三）提升融合应用能力	41
（四）持续完善政策环境	42
（五）加快完善产业生态体系	44
（六）构建数字化碳管理体系	45

图目录

图 1 数字化、绿色化、工业化逻辑关系.....	2
图 2 工业数字化绿色化融合发展阶段.....	4
图 3 工业数字化绿色化融合发展“四梁八柱”思路框架	21

一、工业数绿融合发展的内涵和重要意义

（一）工业数绿融合发展的内涵

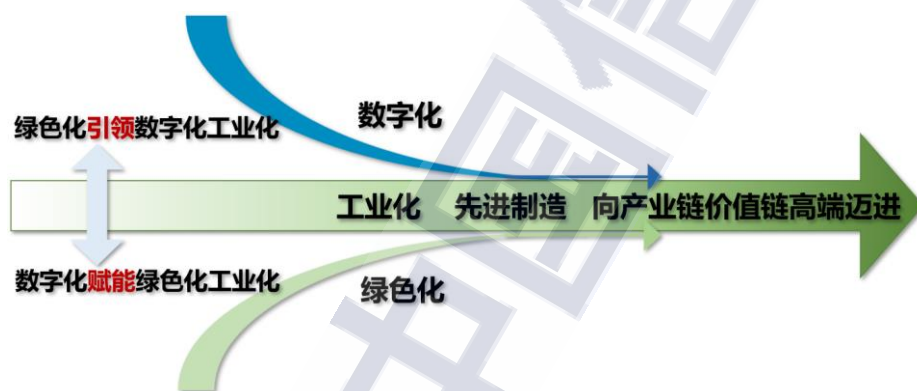
数字化是借助云计算、大数据、人工智能、物联网等技术手段，以数据为核心驱动力，促进企业商业模式、生产模式、经营管理转型升级的一个动态过程。绿色化是经济社会发展的方向、目标，也是状态、结果、评价的标准。绿色发展是绿色化在发展模式上的体现，强调经济活动和结果的绿色化。

工业数字化发展是基于网络信息技术，推动技术进步、效率提升和组织变革的融合应用模式。工业绿色化发展是通过集成利用各类先进技术，实现制造业向环境影响小、资源利用高、经济效益好的绿色化方向发展。

工业数字化绿色化融合发展的内涵，是指在工业文明向生态文明发展的过程中，以数据资源作为关键生产要素，以新型通信技术融合应用、全要素数字化转型为重要推动力，以现代信息网络为重要载体，以减污降碳扩绿增长为重要抓手，不断破除数字化和绿色化之间互相独立的技术壁垒，数字化绿色化作用于工业化，共同推动工业高质量发展，不断提高工业数字化、绿色化、先进化的水平，实现经济效益与生态效益、社会效益共赢的工业经济增长方式。

数字化是绿色化和工业高质量发展的途径和手段，绿色化则是数字化和工业高质量发展的底色和方向。数字化和绿色化二者之间

并不是单方向的数字化赋能绿色化，而是相互补充、相互促进。绿色化是目标，数字化是手段，这种手段与目标双作用于工业化，形成新型工业化道路。数字化对绿色化和工业化具有放大、叠加、倍增作用；绿色化引领数字化和工业化，绿色化引领和约束着数字化和工业化的方向和目标，工业化牵引和拉动数字技术和绿色技术的进步，数字化转型、工业经济的发展需要践行绿色发展的理念。



来源：中国信息通信研究院

图 1 数字化、绿色化、工业化逻辑关系

在融合的初级阶段，工业数字化、绿色化在政策上、技术上、目标上都是独立的个体，各自独立开展，由最初的互动发展到协同转型促进工业发展；在融合的高级阶段，数字经济高度发达，工业数字化和绿色化不再是两个独立的过程，将在目标上、技术上全方位深度融合、合二为一、不分彼此、不可分割，实现工业经济高质量发展。

（二）工业数绿融合发展的特征

协调性。融合发展是工业制造、数字经济、生态环境“三位一体”的新型发展模式，是人与自然和谐的发展，是安全高效的发展，需要统筹工业经济发展、数字经济发展、能源禀赋、资源环境承载力等多方面的协调，从而促进工业经济发展和生态改善的良性互动，实现绿色富国和绿色惠民。

系统性。从领域层面看，融合发展既包括传统高耗能行业，也涉及节能环保、新一代信息技术等战略性新兴产业，从具体措施看，涵盖政策、技术、标准、人才、市场、财税、国土空间规划等众多内容，是一项系统性复杂工程，在注重经济环境等方面均衡发展的同时，需要在不同层面、不同内容统筹考虑、稳步有序推进。

先进性。数字化是我国经济增长的新动能和关键支撑，也是实现先进制造、构建现代化工业体系的重要途径，绿色化是制造业向高端发展必然选择，更是全球经济竞争制高点，数字化和绿色化是我国经济发展的主旋律，二者融合发展促进新产业、新业态和新模式不断涌现，推动形成一批先导性产业，引领工业绿色高质量发展。

动态性。工业发展的不同阶段、碳达峰碳中和的不同进程，工业数绿融合的需求和所面临的问题也是不一样的，因此，工业数绿融合发展的工作思路和政策举措不是一成不变的，不能用固化的视角来看待，需要根据融合发展的阶段、实践的深入、认识的升华而

不断地丰富、不断地完善。

长期性。工业数绿融合发展，不是一朝一夕的事情，不可能一蹴而就，而是一项长期的综合性战略任务。需要持续用力，要立足当前、着眼长远，科学运筹、顶层设计，有计划、有步骤、有重点、分层次、多角度推进工业数绿融合深度发展，构建现代化工业体系。

（三）工业数绿融合发展演进脉络

工业数字化绿色化融合发展是一个由初级到高级、由简单到复杂、由协同到融合的螺旋式上升过程，是以适应人与自然和谐共生、经济高质量可持续发展为特征的发展模式。从发展阶段来看，可分为以下四个阶段，工业发展的底色由“浅绿”逐渐向“深绿”发展。



来源：中国信息通信研究院

图2 工业数字化绿色化融合发展阶段

初期萌芽阶段（2002-2015 年）：“两化”融合促进节能减排

2002 年十六大提出科学发展观，经济与环境协调发展问题被提上议程。2007 年党的十七大明确提出“要加快转变经济发展方式”，这是我国开启绿色发展的重大进步。在数字经济方面，我国早期的

探索主要集中于信息化建设和电子商务发展领域。这一阶段工业数字化绿色化融合发展的理念和政策还处于萌芽阶段，局限在“两化”融合（“信息化和工业化”融合）层面。工信部《2010 年工业节能与综合利用工作要点》、工信部、发改委等《工业领域应对气候变化行动方案（2012-2020 年）》、工信部《工业节能“十二五”规划》等文件中，均提到“两化”融合促进节能减排。

探索起步阶段（2016-2020 年）：互联网+绿色制造

2016 年“可持续发展理念”被列为全面建成小康社会五大发展理念之一。2019 年新发展理念、生态文明和建设美丽中国的要求写入宪法。数字经济在这一阶段迈入了成熟期，数字经济逐步上升为国家战略高度。在该阶段，工业占 GDP 的比重持续下降，形成了较为完善的产业体系，工信部“十三五”工业绿色发展规划十大任务之一是实施绿色制造+互联网，首次提出提升工业绿色智能水平。工信部、发改委等部门联合印发的《绿色制造工程实施指南（2016-2020 年）》，基本原则之一就是积极应用信息网络技术和大数据等先进手段，在各行业大中小企业全面推行绿色制造，加快构建绿色制造体系。

加速推进阶段（2021-2035 年）：工业领域数字化绿色化协同转型

随着碳达峰碳中和目标的提出，对于工业发展过程中的生态、环境因素的重视也达到了前所未有的高度。在数字经济方面，十四五规划纲要提出要建设数字中国，数字经济已成为我国重要的战略

部署和发展方向，将成为我国经济实现转型、高质量发展的创新驱动力。与此同时，工业数字化绿色化融合发展明显提速，迈上新征程并上升到了国家战略高度。我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系提出要推进工业领域数字化智能化绿色化融合发展，“十四五”工业绿色发展规划六大转型行动之一是加速生产方式数字化转型。在这一阶段，我国将完成工业化后期向后工业化阶段的过渡，高耗能产品产量陆续达到峰值并进入平台期，产品综合能效进一步提高，数字化绿色化协同促进工业绿色高质量发展，融合程度逐步深化。

深度融合阶段（2036-2050 年）：工业领域数字化绿色化一体化

在这一阶段，我国碳排放结束平台期进入快速下降阶段，并为 2060 年实现碳中和做好攻坚准备，经济结构持续优化、经济质量效益和核心竞争力显著提升。钢铁、水泥、化工、有色金属等高耗能领域的数字化绿色化融合技术实现规模化应用，能效水平全球领先，工业经济增长与碳排放逐渐脱钩。该阶段数字经济高度发达，工业数字化绿色化融合发展的主题是全面智能化、数字化、网络化和低碳化，数字化绿色化将全方面全过程深度融合成为一体，很难区分是数字化的贡献，还是绿色化的贡献。

（四）工业数绿融合发展意义重大

过去我国制造业发展主要依托传统粗放型发展方式，通过高投入、高消耗、高排放以获得高产出，经济质量效益较低，环境污染

问题突出，这既降低了人民群众的幸福感、获得感，也不利于生态文明建设和绿色发展，显著影响了我国制造业国际竞争力的提升。在经济发展步入新常态，资源环境约束不断增强的当下，在绿色制造领域加快集成各类先进数字化技术，既是时代之需，也是工业绿色制造演进发展应有之义，更是高质量发展的内在要求和必由之路。

加快生态文明建设进程。世界气象组织（WMO）发布的《2021年全球气候状况报告》显示，2021年全球平均气温（1月至9月）比工业化前（1850至1900年）高出约1.09摄氏度，被世界气象组织列为全球有记录以来第六个或第七个最温暖的年份。数据显示，2020年全球温室气体浓度已达到新高，而这种增长在2021年仍在继续。温室气体浓度增高、陆地和海洋温度升高、海平面上升、冰川融化及退缩等极端天气气候加剧。应对气候变化、着力推动制造业节能减排，不仅是当今全球各国共同面临的严峻挑战，也是中国制造未来实现可持续发展、建设美丽中国的内在要求。利用好数字化新技术新模式积极推动制造业低碳转型发展，是探索资源节约型、环境友好型绿色发展道路的关键发力点，尤其是在经济复苏需求强劲的后疫情时代，积极发展工业数字化绿色化融合将通过互联网技术的强大纽带加速人与生态环境的友好协调发展，助力实现经济建设与生态文明的双赢。

加快制造强国建设步伐。工业数字化绿色化融合涵盖了精益制造、敏捷制造、智能制造等先进制造模式，集成了各类互联网技术

与传统制造的融合创新，以及绿色可持续发展的新模式新业态，是制造业综合实力的重要体现。从全球看，制造业的绿色化、智能化是企业转型发展的大趋势，是全球制造业竞争与合作的关键赛道。我国作为传统的制造业大国和互联网大国，在新时期要保持既往优势，实现新一轮的快速增长，需要将传统优势进行有效整合，重塑核心竞争力。工业数字化绿色化融合，就是利用新一代科技革命涌现出的前沿互联网技术，加快传统制造业全流程的绿色化、智能化改造，深入推进制造业结构调整，以绿色可持续的思维推动制造业完成由大到强的蜕变。

加快提升人民获得感。良好生态环境是最公平的公共产品，是最普惠的民生福祉。绿色发展是“最大的政治”，事关民众健康、人民福祉、民族未来。改革开放 40 多年来，我国以高投入、高消耗、高排放的粗放发展模式推动经济实现飞速发展，提高了人民的物质生活水平，但同时也付出了巨大的资源与环境代价，影响了人民生活水平的持续提高。工业数字化绿色化融合，通过互联网将绿色基因注入传统的工业园区、工厂、工业制品中，形成先进生产组织活动、先进监测管理能力，组织各方共同构建起绿色制造的硬标准、硬制度、硬环境，营造出环境友好型的绿色产业体系，不断拓展环境容量、改善生产生活，提升人民群众的幸福感和获得感。

加快提升国际竞争能力。2008 年国际金融危机后，为刺激经济振兴、创造就业机会、解决环境问题，联合国环境署提出的绿色经

济发展议题被发达国家广泛采纳。在发达国家的共同推动下，绿色发展成为国际趋势，绿色制造成为竞争焦点，制造产品出口发达国家的门槛被进一步提高。我国要想加快构建以国内大循环为主体，国内国际双循环相互促进的新发展格局，就要求出口的产品与服务既要在量上领先，又要在质上有优势。工业数字化绿色化融合，通过推动互联网技术与制造技术深度融合，创新绿色制造技术、提升生产制造效率、降低资源投入、减少环境污染，让创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念贯穿国内大循环、国内国际双循环始终，加快提升我国绿色制造的国际竞争能力。

二、工业数绿融合发展的国内外探索和实践

随着工业化进入中后期，发达国家工业未来之路迎来了新主题、新赛道，即数字化绿色化融合发展。基于制造业和信息通信领域的技术积累，发达国家地区在绿色制造、融合应用等方面较为成熟，各自也提出了不同的政策和路径，其共性特点在于高度重视顶层设计，从目标设定、技术创新、财税激励等角度谋求构建相对系统但各有侧重的政策体系，推动数字技术与绿色节能等紧密融合。我国也多措并举、多方发力推进工业领域数字化绿色化融合发展。

（一）欧盟：制定战略规划，引领数字和绿色双重转型

欧盟高度重视绿色工业和数字化的发展，在目标制定与顶层框架设计方面始终走在全球前沿，已经构建了较完善的政策体系，配

套部署了重点行业措施，布局了科技研发项目，采取了多样化的财政与金融保障措施，具有很好的借鉴意义。

在绿色战略方面，2019 年 12 月 11 日欧盟委员会发布了《欧洲绿色新政》，通过向清洁能源和循环经济转型，使欧洲到 2050 年成为全球首个碳中和大陆，以阻止气候变化、促进欧洲经济稳定可持续发展。新政初步明确了重点领域实现目标的政策路径，其中在工业领域，要推动工业向清洁循环经济转型，充分挖掘数字转型的潜力是实现绿色新政目标的关键要素，使人工智能、5G、云计算和边缘计算及物联网等数字技术尽快在欧盟应对气候变化和保护环境的政策中发挥重要作用。

在工业战略方面，2020 年 3 月，欧盟委员会发布《欧洲工业战略》，旨在提升欧盟全球竞争力并带动欧洲绿色工业和数字化的发展，助推欧洲向更加可持续、数字化和更具全球竞争力的经济转型。主要包括三方面的内容：提升欧洲工业竞争力并以制定规则打造公平竞争环境；2050 年实现欧洲气候中立及绿色发展；塑造欧洲的数字化未来。考虑到新冠肺炎危机后的新形势，2021 年 5 月又发布了更新版的《欧洲工业战略》，将采取新的措施，制定协调一致的监管框架，以实现“欧洲数字十年”等目标，加速推出可再生能源，确保获得充足的可负担的脱碳电力等，开展对竞争规则的广泛审查，确保其支持向绿色化和数字化双过渡。

在绿色和数字双重转型战略方面，2022 年 6 月 29 日欧盟发布

《2022 年战略前瞻报告：在新的地缘政治背景下实现绿色与数字化转型》，确定了十个关键行动领域，目标是最大限度地发挥气候和数字雄心之间的协同作用和一致性，从而加强欧盟跨部门弹性和开放的战略自主权，为应对 2050 年新的全球挑战做好准备。绿色和数字化转型是 2019 年欧盟委员会政治议程的首要任务。鉴于目前地缘政治的紧张，从能源和食品，到国防和尖端技术，欧洲正在加速气候和数字全球领导力。报告对双重转型之间的相互作用提出了面向未来的整体分析，同时考虑了新兴技术的作用以及影响其转型的关键地缘政治、社会、经济和监管因素。提出通过新技术使能源、交通、工业、建筑和农业领域实现绿色和数字转型是关键，在工业领域，通过“数字孪生”，即一个物理对象或过程的虚拟对应物，利用实时数据和机器学习，可以帮助改进设计、生产和运营维护。

（二）英国：发挥技术优势，积极部署绿色工业革命

与其他欧洲国家相比，英国工业数字化转型步伐更快，这主要在于英国重视科技产业和低碳技术优势，并积极部署绿色工业革命，以实现净零排放战略目标。

高度重视技术优势。一是以信息科技推动数字化转型。2019 年，英国启动了一项总额 3400 万英镑的政府投资计划，聚焦信息技术领域机器人可信赖自治系统平台和新运输系统等。二是瞄准低碳技术优势。2021 年 11 月，英国发布《净零战略》，其核心在于建立以数

据和数字化为基础，更智能、灵活的能源系统，支持英国企业向绿色技术过渡。该战略包含一系列绿色改革承诺，如帮助英国在低碳技术领域（氢能技术等）获得竞争优势。

积极部署工业绿色发展。2017 年 1 月，英国政府发布“现代工业战略”绿皮书，确立提高能源供应效率及绿色发展等十项重点任务，包括工业数字化等重点领域。同年，《数字发展战略》出台，旨在推动英国企业数字化转型。2021 年 3 月，英国在 G7 国家中率先推出《工业脱碳战略》，以减少重工业和能源密集型行业的碳足迹。2022 年 4 月，《英国能源安全战略》发布，未来英国将在核能、海上风电、氢能等可再生能源领域加大投资。

（三）美国：注重融合均衡，捍卫制造业综合实力高地

在制定政策方面，美国工业数字化绿色化融合发展注重系统性、整体性、均衡性，在战略规划、成效目标、研发投入、人才培养等方面综合实力位居发达国家首位。

加快构建系统性战略规划。2014 年，美国开始实施先进制造战略，将数字设计与制造等技术作为引领未来产业发展的关键，本质就是推动制造业智能化、绿色化发展。2020 年 12 月，美国工业互联网联盟首次发布《工业数字化转型白皮书》，描述了云计算、数字孪生等关键技术及应用场景，并提出“快速、开放、高效”的创新流程是数字化转型的关键。2022 年 2 月，白宫发布《拜登-哈里斯政府推动清洁工业部门减少排放，重振美国制造业》简报，涵盖“购买

清洁”及 CCUS（碳捕获、利用和封存）技术等政策。

强化绿色化发展成效目标。2020 年在《清洁能源革命和环境正义计划》中，拜登提出美国要在 2035 年前实现无碳发电，在 2050 年之前达到碳净零排放。计划具体行动包括制定更严格的燃油排放标准，确保新销售的轻/中型车辆 100%实现电动化，对重型车辆进行较大改进升级；将未来的液体燃料加倍，建造首批生物燃料工厂；2030 年前全美建成超过 50 万个新增公共充电站等。

持续加大创新技术研发投入。在美国，研发投入是联邦政府资金支持的重点。2016 年 6 月，美国公布“智能制造振兴计划”获得 1.4 亿美元研发资金，提出建立内嵌能压缩和排放降低（REMADE）材料制造研究所、制造环境下机器人制造创新研究所等 5 大制造中心。2022 年 2 月，美国能源局发布启动两党基础设施法（Bipartisan Infrastructure Law），提出将 10 亿美元用于清洁氢电解计划的研发等。

积极开展专业领域人才培养。2018 年 10 月，美国发布《先进制造业美国领导力战略》，提出“教育、培训和集聚制造业劳动力”等三大目标，并把制造工程教育、职业和技术教育等作为优先行动事项。美国还大力提倡“绿领”概念，出台“绿色就业与培训计划”，围绕能源效率和可再生能源岗位，每年从培训基金中拿出 1.5 亿美元资助联邦和地方政府就业培训计划，每年培训 3.5 万名工人进入“绿色”行业。

（四）日本：强调政策融合，推动数字赋能绿色发展

当前日本面临着绿色发展、区域发展、生产力增长、低出生率和人口老龄化等一系列挑战，亟需推动数字化来实现可持续发展。日本已经实现碳达峰，目前发展重点聚焦在 2050 年实现碳中和。日本工业数字化绿色化发展政策注重于总体规划和财政补贴。

在绿色战略方面，2020 年 12 月 25 日日本发布《2050 年碳中和绿色增长战略》，明确了“2050 年日本实现净零排放”的碳中和目标，基于预算、税制、金融、监管、国际合作 5 个政策工具，将在海上风电、电动汽车、氢能等 14 个重点领域推进减排，提出了具体的发展目标和重点任务。半导体和通信行业作为 14 个重点领域之一，主要包括两个方面的内容：一是利用数字化提高能源消费的效率 and 减少二氧化碳排放；二是数字设备和信息通信自身的节能和环保，2030 年所有新建数据中心节能 30%。同时还提到要加快制定制造业、企业和区域的数字化方案，推进利用数字技术促进地区二氧化碳减排示范。

在数字战略方面，2021 年 6 月日本经济产业省首次发布《半导体数字产业战略》，从半导体、数字基础设施、数字产业三个维度提出了总体和细分领域的战略目标以及施策方向，夯实基础提升话语权，确保经济与环境共优，同步推进数字化和绿色技术。在半导体领域，支持数字化和绿色投资的设计开发，推进半导体技术的绿色

革新，加快研发节能、低功耗的功率半导体元器件，加快新一代边缘计算技术以及超分散绿色计算技术的研发。在数字基础设施领域，开发低功耗设施，提高服务器、通信设备、数据中心的能源效率和性能，推广使用可再生能源发电，降低数字化转型带来的能源消耗。在数字产业领域，建立兼具可靠、开放、保密、绿色、透明且可持续的高质量云，应用在工业领域智能工厂，侧重体现实时性和低延迟性，确保持续提高环境变化响应能力。在横向政策措施方面，与绿色政策和能源政策融合实施。一是加强“数字×绿色”项目管理，统筹管理推动碳中和的数字技术成果。二是与绿色发展战略协调一致，半导体和数字产业战略的实施要与绿色发展战略、能源规划等其他战略保持方向一致，密切联系绿色发展。

提供绿色制造财税支持。一是对技术研发提供补贴。2008 年，实施“环境与能源革新技术开发计划”，投资 300 亿美元推进插电式混合动力车及燃料电池车等五大绿色技术研发。二是调整碳税征收模式。2011 年，日本进行税制改革，碳税改为以化石燃料碳排放量为征收基础，这既避免了重复征税，也减弱了碳税推行阻力，对工业企业绿色化发展非常有利。三是提供预算支持。《2050 碳中和绿色增长战略》明确，十年内设立一个 2 万亿日元的绿色创新基金，作为推进企业研发和资本投资的激励手段，有望撬动 15 万亿日元。

（五）中国：多措并举、多方发力，推动数绿深度融合

随着数字技术的快速发展和数字基础设施的快速部署，数字化已成为我国工业经济增长的关键支撑力量。但数字化不是独立存在的，其作用表现在为各行业服务，并与各行业融合发展，制造企业和数字企业纷纷进行工业领域数字化绿色化融合发展的实践应用，数绿融合已经从初期探索发展到协同转型加速推进阶段。

顶层设计初步建立。中共中央印发《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》，指出“推动传统产业高端化、智能化、绿色化”。中共中央印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中要求推动新一代信息通信技术与绿色低碳产业深度融合，国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》中指出“推进工业领域数字化智能化绿色化融合发展”。2021 年 12 月工信部发布《“十四五”工业绿色发展规划》中六大转型之一为加速生产方式数字化转型，采用新一代信息技术提升能源、资源、环境管理水平，深化生产制造过程的数字化应用，赋能绿色制造。2021 年 11 月工信部发布《“十四五”信息通信行业发展规划》中指出“推动数字化绿色化协同发展”。2021 年 12 月中央网络安全和信息化委员会发布《“十四五”国家信息化规划》提出“加速信息技术赋能社会各领域节能减排”。2022 年 6 月工信部等六部门印发《工业能效提升行动计划》明确要“积极推动数字能效提档升级”，

充分发挥数字技术对工业能效提升的赋能作用。2022 年 6 月工信部等六部门印发《**工业水效提升行动计划**》提出“强化数字赋能，提升管理服务能力”，提高数字化水效管理水平，提升智慧化节水服务能力。2022 年 7 月工信部等五部门联合发布了《**数字化助力消费品工业“三品”行动方案（2022-2025 年）**》，结合当前产业发展实际和技术演进趋势，确立了未来四年数字化助力消费品工业**增品种、提品质、创品牌**的主要目标。工业数字化绿色化融合发展的政策体系不断健全，为融合发展提供了战略指引。

数字技术创新发展。“十三五”以来是数字技术处于加速发展的爆发期，在工业研发设计、生产制造、经营管理、运维服务等关键业务环节广泛应用，推动了工业的质量变革、效率变革、动力变革，助力工业绿色低碳转型不断提速。**5G** 推动了人、机、物、系统全面互联，助力网络供给能力提升和实现基础设施集约共享。**物联网**通过末端智能感知，将技术与设备高效连接。**大数据**促进各类资源的网络化共享、集约化整合、协作化开发、高效化利用。**云计算**推动企业内部生产和能源效率提升。**人工智能**通过机器思考和学习，提升企业各环节感知、分析、决策、控制等能力。**工业互联网**构建了全要素、全产业链、全价值链全面连接的新型生产制造和服务体系。**区块链**促进了数据可信流转、推动了不同主体的可信协作。数字技术不断创新，为工业数字化绿色化融合发展奠定了坚实技术基础。

数字基础设施不断夯实。在通信网络基础设施方面，已经取得

了跨越式发展和进步，“十三五”期间，我国建成了全球规模最大的固定和移动通信网络，行政村通光纤和 4G 比例均超 98%，5G 网络实现覆盖全国所有地级市城区、超过 97% 的县城和 40% 的乡镇，建立超过 2 亿个 5G 终端连接数，超过 150.6 万个 5G 基站完成部署，成为了数字经济迅速发展坚强基石。在算力基础设施方面，数据中心等算力基础设施是数据要素的“资源池”和“加工厂”，全国一体化大数据中心体系完成总体布局设计，“东数西算”工程正式全面启动，在京津冀等 8 地启动建设国家算力枢纽节点，并规划了 10 个国家数据中心集群，推动数据中心合理布局、供需平衡、绿色集约、互联互通和区域协调发展。截至 2021 年底，全国在用超大型、大型数据中心超过 450 个，智算中心超过 20 个，算力总规模超过 140 EFlops（每秒浮点运算次数）。在融合基础设施方面，国家级工业互联网大数据中心等 75 个项目建成投入运行，全国“5G+工业互联网”在建项目总数达到 2400 个，培育大型工业互联网平台 150 家，遴选 123 个工业互联网试点示范项目和 4 个产业示范基地，超过 40 万家工业制造行业企业上云、触网，工业互联网连接工业设备超过 7800 万台。

流程制造企业数绿融合实践。流程制造企业依托大数据、云计算、人工智能、物联网等数字技术对生产流程各环节的全面渗透，不断加深与绿色技术、工艺和装备的深度融合，提升企业的生产、能源、资源和环保效率，达成节能提效减本增质目标，推动企业绿

色低碳转型升级。企业通过数字化绿色化融合发展改造升级，促进了产业链协同发展、提高了生产过程能源及物料的利用效率、实现了全流程能源管控和用能设备的智能管控运维全覆盖、推进生产工艺不断优化、推动末端治污减排减少环境污染。

案例：酒泉钢铁通过大数据分析和智能化管理，实现了单座高炉每年减少碳排放 2 万吨，冶炼效率提升 10%。九江石化将新一代信息技术与石化生产最本质环节紧密结合，设备自动化控制率达到 95%，生产数据自动采集率 95%以上，运行成本降低 22.5%，能耗降低 2%。

离散制造企业数绿融合实践。离散制造企业主要在产品研发设计、生产制造、环境排放、供应链管理等环节，通过数字孪生、工业互联网、人工智能、物联网等数字技术，提升能源资源利用效率、节能降碳，治污减排。企业通过数字化绿色化融合发展改造升级，在源头环节开展产品绿色低碳设计，推进产品轻量化减量化、降低产品能耗、提升产品环保低碳性能、降低产品使用和回收阶段的环境影响；在生产环节，推动工艺和装备优化升级、提升能源资源管理水平、推进个性化定制和柔性生产、实现生产过程精细化智能化管理和运维、减少或避免环境排放；对于供应商，建立动态清单管理机制，智能化调配上下游物料和产品。

案例：中车、北汽、长安等汽车制造企业依托人工智能、大数据等技术开展产品智能化轻量设计，使同等材料车身在性能不变下

重量减少 7-10%，燃油能耗降低 6%-8%，汽车使用阶段降低二氧化碳排放 13%。联想合肥联宝工厂采用工业互联网技术，通过提高生产效率、减少生产线闲置等方式，每年节省超过 2700 兆瓦时的电力。

数字企业数绿融合实践。信息通信服务企业运用大数据、云计算、人工智能等数字技术，对自身业务进行整合优化，实现集约、高效等智慧服务体系和数据治理管理能力，大力推进自身能耗降低，深化信息基础设施智能化绿色化运营管理。同时，为其他行业企业提供定制化服务，在能源优化、决策控制等方面进行改造优化，实现数字感知、信息集成、智慧管理，促进其他行业实现智能化绿色化发展。对于数据中心，通过不断整合与改造，配套设施技术不断改进，促进数据中心总体能效水平提高，加强算力协同，提高云资源利用率。对于 5G 基站，不断优化网络结构，加强新技术、新器件应用，推进共建共享，推动降低基站能耗。

案例：阿里云基于工业互联网、人工智能等数字技术，服务海螺水泥“两磨一烧”生产环节，实现过程高效自动控制，降低 2%-3% 的综合能耗。中国联通上海分公司结合大数据和人工智能算力，创新实施多样性节能方案，进一步降低基站能耗。中国电信与中国联通共建共享 5G 基站 70 万个，年节约用电超 100 亿度，碳排放减少近 600 万吨。

三、工业数绿融合发展的实施路径

（一）工业数绿融合总体思路框架

工业数字化绿色化融合发展是高质量发展的内在要求和必然路径，融合发展的框架可以概括为“四个层面、四个方向”，一个总体目标是实现高质量发展、先进制造，具体指从政府和产业两个维度“国家、行业、区域和企业”四个层面实施融合，重点突破管理和质量两个着力点“战略、技术、质量和人才”四个融合方向，整体上构成“四梁八柱”主体框架，通过抓住重点领域和关键环节，找准数绿融合的着力点和支撑点，为工业数绿融合、行稳致远夯基铸台、立柱架梁。



来源：中国信息通信研究院

图3 工业数字化绿色化融合发展“四梁八柱”思路框架

1. 国家、区域、行业、企业为融合四个层面

国家层面：顶层设计。工业数绿融合发展是构建新发展格局的

战略选择和关键支撑。国家层面应为工业数绿融合发展描绘蓝图、提出战略指引。高瞻远瞩洞悉未来的发展趋势和变化，顺应工业数绿融合发展的大趋势，不能简单模仿照搬国际上的做法，而是要根据中国工业的发展阶段、产业数字化绿色化状况、数字产业化绿色化的程度、资源能源禀赋，探索符合中国国情的发展方式与融合模式，不断推进工业高级化和现代化，中国工业高质量发展也将迎来更为广阔的空间。

区域层面：特色发展因地制宜。数绿融合不仅体现在国家和行业的发展战略，更要落实到区域层面，区域在政策措施层面具有独特的作用和深刻影响，需要“上下联动”推动融合发展。中国国土面积辽阔，各地区域经济发展、产业布局和能源禀赋等不同，区域的工业绿色经济和数字经济发展并不平衡。东部的北京市、上海市已经实现了工业化，其他地区仍处于工业化加速发展进程之中，尤其是广大中西部地区既要大力发展工业，又要考虑资源能源环境影响，绿色发展任重道远。西部地区可再生能源丰富，“东数西算”工程将东部算力需求有序引导到西部，促进东西部协同联动。中国区域数字经济呈现南优北劣、“东高、中平、西低”梯度分布的发展特征，因此，着眼于区域层面，因地制宜推进数绿融合发展至关重要。

行业层面：优化结构分业施策。数字化与绿色化的融合能够使产业结构升级换代，形成以数字产业为先导、绿色产业和传统产业为支撑、服务业全面发展的新局面，催生、衍生出新模式、新业态、

新架构，引发生产关系的变革，促使工业经济增长方式从粗放型向资源能源节约型、环境友好型方式转变，推进工业经济向数字经济、绿色经济过渡，建立现代化的工业生产体系。工业内部不同的细分行业门类，应根据不同行业发展特点分业施策。另外制造业绿色低碳转型仍需解决成本和效率的问题，数字化对工业绿色发展的赋能作用着力点恰好体现在节本增效提质，推动我国制造业向高端化、智能化、绿色化转型发展，促进产业结构更高级更合理。

企业层面：智能绿色制造。数绿融合发展，最终的实施要落实到各行业的大中小微企业。数绿在企业层面的融合，一种形式是数字企业与工业制造企业合作，另一形式是工业制造企业内部成立数字化转型、绿色发展的部门来实现融合发展。两类形式的融合，目标都是实施智能绿色制造。数字企业要更多了解绿色经济和工业制造企业；工业制造企业要尽快熟悉掌握信息技术，增强数字化、绿色化的积极性，这两类企业要跨界融合、优势互补，找到数字化绿色化融合发展的突破口，抢抓新机遇，拓展新空间，充分挖掘数据在促进绿色发展方面的价值，利用数字技术助力制造企业实现绿色转型，促进企业生产方式绿色精益化、能源管理的绿色智慧化、资源利用绿色循环化，打造智能绿色工厂、绿色供应链和绿色产品。

2. 战略、技术、业务、人才为融合四个方向

战略的融合：协调一致。数字化与绿色化发展战略的融合，即

数字化发展战略与绿色化发展战略要协调一致，数字化发展模式与绿色化发展模式要高度匹配，数字化规划与绿色化发展规划要密切配合。在宏观层面，结合我国工业领域发展的实际情况，制定工业领域数字化绿色化深度融合发展的联合战略，发布相关纲领文件，不断做强做优我国工业经济发展，为工业高质量发展提供有力支撑。在中观层面，工业领域数字化绿色化转型涉及多区域，多行业，流程复杂，其发展战略需要多方协调、互相配合。要把数绿融合发展纳入行业或区域发展规划，为融合发展聚集、筹措各类资源和保障，破除融合发展的障碍。在微观层面，企业应充分认识数字化绿色化融合发展的必然趋势，以及作为创新发展模式和引领先进制造的第一动力，确立融合发展方向，以数字技术与绿色手段深度融合为主线，在数字化转型战略中落实绿色化战略发展，加快企业智能绿色制造进程，不断激发企业核心技术实现突破。

技术的融合：创新引领。数字化技术与绿色化技术的融合，即以数字技术应用为重点，以绿色制造为方向，对企业研发设计、生产流程进行再造，实现智能绿色制造。在能源技术方面，云计算、大数据、区块链等数字化技术与绿色技术的融合应用，加快构建适应高比例可再生能源发展的新型电力系统，提升产业链智慧能源的水平，推动低碳能源替代高碳能源、可再生能源替代化石能源进程。在节能降碳技术方面，传统制造企业在智能制造工厂的建设过程中践行绿色低碳理念，形成智能绿色制造体系。部署工业互联网、边

缘计算、云计算等数字化技术赋能绿色技术装备，助力提升装备运行效率、优化生产方案、改进工艺工序，推进工业行业节能降碳工作。在环保技术方面，数字智能设备与绿色装备的融合，创新科技成果，极大的节约材料、能源等不可再生资源。通过对钢铁、有色、建材、石油化工等重点行业的有毒有害物质和污染排放联网监测与分析，提高资源、能源利用效率的同时也提高了环保综合效益。

业务的融合：提质增效。数字化和绿色化在业务上的融合，即以绿色化为业务发展方向，加快企业在生产、经营、管理、服务等方面的数字化水平，抓住业务发展需求，在不断革新中提高核心竞争力。在生产制造方面，以数字化设备为基础，围绕绿色创新研究和开发设计、工艺管理和加工制造、过程协同和质量控制、物料配送和产品管理等生产制造关键环节推进数字化，以提高生产制造全过程工作效能。在资源配置方面，以绿色化理念为基础，围绕外部协作、内部计划、及时响应等关键环节推进数字化，以提高业务市场的响应效率。在运营服务方面，以数字化管理为基础，围绕产品市场与客户关系、人力资源与资本运作、发展战略与风险管理等关键环节推进绿色供应链管理体系，实现管理服务绿色智能化，提高业务管理、决策科学化水平。

人才的融合：重要力量。数字化和绿色化在人才上的融合，即融合专业数字化和绿色低碳环保领域综合性高素质人才，从而实现准确判断外部环境未来发展的方向，及时推进工业数绿融合并做好

融合的战略规划工作。在业务需求方面，工业领域数字化和绿色化融合不仅涉及数字化和绿色化技术的开发应用，还需要针对不同类型企业需求提供定制化服务，因而需要掌握模型算法、数据分析，碳资产管理等多样化技能的人才。推动数字化和绿色化深度融合业务迫切需要高层管理、中层推动、基层应用、专业技术等多样化、多层次、综合性的复合型、交叉型人才。在专业培养方面，构筑人才优势是数字化和绿色化融合发展的重要力量。通过专业授课和企业实践指导，将理论与实践结合，提高培养效率，逐步实现所需人才的储备与积累，形成具有数字化和绿色化深度融合专业技术的人才队伍，提升数字化和绿色化融合能力，助力工业智能绿色制造。

（二）区域：特色发展因地制宜

1. 资源型：实施数字化改造，推进数字“赋绿”

资源依赖型城市是资源富集地区，资源开发与经济社会发展、生态环境保护之间不平衡的矛盾突出，可持续发展压力较大，工业绿色转型迫在眉睫。

一是用数字技术调整优化能源结构。资源依赖型城市往往具有较好的自然气候和生态资源禀赋，结合自身在太阳能、风能等方面的特有禀赋，推动优势可再生能源的规模利用。在能源供给侧，实施能源互联网建设行动，抢占转型发展制高点，加快建设能源大数据中心，构建“风光水火”多源互补、“源网荷储”协调高效的“互

联网+”智慧能源系统。

二是用数字技术对传统行业绿色化改造。运用数字技术改造传统产业，提高传统产业的信息化、数字化、智能化水平，从数字中挖掘潜力，增强传统产业产品制造和研发能力，推动传统产业及其产品向价值链高端迈进，生产出低消耗、少污染、高附加值的产品。在生产末端，资源产业在开采过程和使用后均存在大量废弃物，可以利用数字技术创新改善工业固废回收利用方式，建立高效、规范的“互联网+”固废回收体系，推动工业固废“变废为宝”。

案例：山西朔州是被誉为中国煤炭资源最富集的“煤炭金三角”，煤炭、电力两大行业产值占全市工业总产值的 90%以上。近年来大力调整电力产业结构，新建和投产一大批煤矸石（煤炭工业的主要废弃物）发电厂以及风力发电、太阳能发电等新能源电厂，新能源装机容量占全省 1/4，同时建立了 5G 智慧矿山和智慧电厂，提高生产效率，积极拓展能源互联网，努力实现传统产业高端化智能化绿色化发展。

2. 创新型：推动低碳产业建设，实现数字“强绿”

与中西部相比，这些地区高技术产业和高端制造业占比大，工业化水平高，科技实力雄厚，绿色制造和数字经济发展程度高，碳强度低，包括北京、上海、天津、江苏、浙江、广东等，工业数绿融合发展的基础较好，可为全国其他地区做出表率 and 引领。

一是推动战略性新兴产业等低碳产业建设。建立以低能耗、高产出为特点的高端化、智能化、绿色化和服务化新型工业体系，是东部地区推进工业数绿融合发展的重要路径。基于区域自身良好的科技支撑和人才储备，推动新能源、电子信息等战略性新兴产业的发展，培养其成为区域低碳发展的重要支撑和新的经济增长点。

二是以数字技术引领工业绿色转型。搭建基于云计算等数字技术的区域绿色工业大数据服务平台，开发节能诊断、能耗环保对标、绿色指数评价等功能，促进企业、园区和政府能源环境管理的精细化和高效化。推进企业能源管理智慧化，建设工业重点用能单位能耗和碳排放信息在线采集和动态监测系统，大力推动企业能源管理中心、可视化用能监控系统建设，加强能源数据和碳排放信息的深度挖掘和利用。

案例：镇江是典型非资源型的工业城市，积极引入数字化思维，在全国首创低碳城市建设管理云平台，初步构建工业绿色发展云平台和电能服务云平台，通过大数据、云计算等数字手段推进工业绿色转型。早在 2015 年镇江建成全国首个城市碳排放核算与管理平台，实时精准监测核算重点企业的碳排放，积极探索和推进数字化在工业和城市绿色管理中的应用，努力打造绿色智慧监管新模式。

3. 强化区域协同与优势互补

京津冀协同、长三角一体化、粤港澳大湾区发展是典型的区域

协同建设模式，充分发挥城市群数字经济发达、数字科技领先的优势，与周边区域联合、联动与优势互补，从整个区域来布局 and 安排工业领域数字化绿色化的融合发展。鼓励数字科技企业开发赋能制造业绿色低碳发展的技术、产品和解决方案，构建工业互联网平台，推动实体经济的数字化和绿色化融合发展，增强创新能力、提高生产效率。例如，北京可以将钢铁、装备、石化等工业的数字化和智能化作为重点，与津冀共同打造应用场景，建设工业互联网平台，为融合创新提供更大的市场空间，合力加速推进数字经济与工业绿色发展融合，共同构建智能融合、多元协同、绿色低碳的高质量发展新生态。

（三）行业：优化结构分业施策

1. 促进结构优化

升级产业结构。数绿融合发展能够促进传统行业改进产品质量，提高生产效率，降低生产成本和能耗物耗，加快传统制造业向中高端制造业迈进的步伐，对于产业结构高级化和合理化都有促进作用。另一方面，推动优势企业对落后企业的重组，在集团化重组过程中淘汰落后产能，推动化工企业搬迁入园，鼓励产业集聚发展，提高产业的集中度和资源配置效率，利用集中优势提高传统行业数绿融合水平。

完善空间结构。平衡且合理的产业空间布局有利于我国工业经

济的绿色低碳化发展。在考虑清洁能源富集地区生态承载力的前提下，鼓励东部地区高能耗制造业向西部清洁能源富集地区转移。实施“东数西算”工程，不仅能有效带动信息技术研发制造、通信网络、能源等上下游产业投资，还能推动数据中心合理布局、优化供需，进一步畅通数据要素流通应用，促进大数据中心集约化、规模化、绿色化发展。

培育新业态。数绿融合不断催生新技术、新产品、新产业、新模式、新业态，推动制造业企业形态、生产方式、业务模式和就业方式等发生根本性变革，一系列新产业新业态的出现进一步加速产业结构优化升级。另一方面，数绿融合必然会带动节能环保、新一代信息技术、新能源等绿色低碳产业的快速发展，助力产业结构优化升级。

2. 注重分业施策

不同的工业行业门类存在一定的生产经营性差异，而且在不同的社会发展阶段，对不同工业品的需求不同，各行业的特点决定了数字化绿色化融合发展路径也不完全相同。**钢铁行业**生产流程长，生产工艺复杂，主要面临设备维护效率低、生产过程不透明、下游需求碎片化、环保压力大等痛点。以优化工艺为切入点，在高耗能设备运维、生产工艺透明化、供应链协同全局化、提升环保水平等方向开展数绿融合。**石化化工行业**产业链长，工艺机理复杂，品种

多，生产过程具有较强的连续性，细分产业间关联度高。为了保证稳定品质的连续安全生产，对设备和设施运维要求较高。主要面临设备管理不透明、产业链上下游协同水平不高、安全生产压力大等痛点。以高耗能设备智能管控为切入点，在设备健康管理、炼化生产、供应链协同、安全监控等方面开展数绿融合。**家电行业**是重要的中游行业，上游承载原材料及相应压缩机、电机、面板、集成电路等零部件制造业，下游为线上和线下市场同时推进。聚焦生产智能化水平较低、供应链协同效率低、劳动力较为密集等痛点，以生产智能绿色消费品为切入点，在生产方式自动化柔性化、经营管理平台化、产品服务生态化等方面开展数绿融合。

3. 加快效率变革

一是提升生产效率。促进生产方式高效智能。利用数字技术对生产机组的运行状态和运行环境等进行实时监控和模拟仿真运行，及时制定各生产机组的最优运行策略，实现智能排产、智能控制和智能决策，改变传统行业生产运营模式，有助于提高生产效率。**促进生产资源高效配置。**利用数字技术促进生产方式绿色转型，推动研发设计、原材料供应、加工制造和产品销售等工业生产的全过程精准协同，强化生产资料、技术装备、人力资源等生产要素在企业内部甚至不同企业、行业间融通和共享利用，实现生产资源优化整合和高效配置，提高生产效率。

二是提升能源效率。促进能源管理智慧精益。将网络协同制造、远程运维服务、智能环境数据感知等数字技术与能源监测管理相结合，推动能源管理智慧化和精益化，进而实现工业领域的节能提效。**促进用能结构低碳转型。**通信网络的完善和用户信息采集技术的推广应用能够促进用能供需双向互动，统筹用好化石能源、可再生能源等不同能源品种，助力构建电、热、冷、气等多能高效互补的工业用能结构。

三是提升环保效率。促进生产过程清洁化。以多源环境监测网络建设为基础，推动污染源监管数据、环境质量监测数据、环境治理数据、环境产业数据的开放共享，实现“源头防控、过程监管、综合治理”的环境管理闭环，提高环保效率，促进工业生产过程清洁化。**促进末端治污高效化。**对于水土污染治理，运用移动互联和空间信息等先进技术与理念，打造水土环境数字化监管系统，实现对水质土壤的实时、可视化智慧监管。对于空气污染治理，现代化生态环境监测网络体系可通过搭建高密度的空气质量监测网络，实现对不同地区多维度、全方位空气质量监测，在控制污染标准的前提下提高环保效率。

四是提升资源效率。促进大宗工业固废规模化高效利用。利用物联网、大数据等技术开展信息采集、数据分析、流向监测等创新改善工业尾矿等固废回收利用方式，实现工业资源综合利用产业协同转型升级，建立高效、规范的固废回收体系，提高资源效率。促

进工业再生资源集约化综合利用。以工业再生资源回收衔接模式和“互联网+回收”模式，建立工业废钢铁等工业再生资源回收信息化平台，实现信息流与物质流的统一，集回收、分拣、集散为一体的工业再生资源回收体系，从而实现资源效率的提高。

（四）企业：实施智能绿色制造

1. 生产源头融合：开展数字化绿色设计

应用虚拟现实、数字孪生、工业仿真等数字技术实现研发设计数字化，协同研发低碳新技术、新产品，从源头开始即节能减碳。

一是推动研发设计过程的数字化转型。在研发设计全过程贯穿应用数字技术，对海量过程数据深度挖掘，提升研发设计生产效率，降低实测环境的能耗碳排。如汽车行业利用虚拟仿真技术开展虚拟测试取代实际道路测试，可减少开发成本，有效缩短研发周期，提升研发效率。**二是利用数字技术加强减碳新技术研发。**依托人工智能、物联网等数字技术，加强二氧化碳捕集、利用与固化以及封存技术的研发突破，可直接降低行业碳排放。如研发突破低成本 CCUS 技术，可广泛应用于煤炭开采、钢铁、煤电领域；攻关低渗煤层抽采关键技术，可推进煤矿区煤层气应抽尽抽。**三是利用数字技术加强低碳产品研发。**创新应用数字新技术，加强对无污染或少污染、少能耗、少排放产品的研发力度，有效减少后续环节碳排放。如研发提高电能利用效率的新绿电产品，更多利用非化石燃料可有效降低

煤炭使用总量，支持工业行业绿色化发展。

2. 生产过程设备融合：实施能耗智能管控

以设备终端智能化升级为硬件底座，以能耗监控系统为软件支撑，建立碳全景监测体系，赋能节能减排优化工作。**一是推进生产设备智能化改造。**推进工业生产设备与 5G、人工智能、数字孪生等数字技术的深度融合，加快对工业生产设备实施智能化改造，研发部署无人化、自动化设备，从而实时感知生产设备运行状态，提供生产设备运行数据，为布设各监测调控系统打下坚实的物理基础。如在汽车生产过程中，搭建生产设备实时监控系统，实现故障自动及时报警和设备故障预诊断，提高设备运营维护效率。**二是实施工业生产设备能耗智能管理。**通过生产设备智能终端反馈数据信息，对设备的能源使用、转换、损耗进行数据分析和趋势预测，从而及时调控、优化设备运行状态，提高能源使用效率，达到节能减排的目的。例如钢铁行业的加热炉燃烧控制优化系统，通过实时计算所需的煤气流量，及时对阀门开度进行调控设定，快速将实际炉气温度调节到目标温度，提高燃烧效率，节约能源成本，从而大幅减少碳排放。**三是开展工业生产设备碳全景监测。**以可视化方式呈现工业生产设备的碳排放量，提供碳数据采集、监测、核算和最优减排路径分析，为企业优化升级生产设备提供辅助决策。例如三一重工 18 号工厂打造碳排放大屏，协助企业制定合理科学“双碳”实现路径。

3. 生产过程工艺融合：创新智能绿色工厂

加快绿色工艺、超重力场等先进技术的推广应用，转变传统生产模式，实现原料路线、“三废”治理、资源综合利用等方面的智能化升级。

一是开展工艺流程智能能耗管控。通过建设覆盖生态系统的数字底座，实现生产工艺流程碳排放、监测、计划、调度、统计的统一管理，提升能源管控的精细化程度。如在环保行业中，通过感知所需处理的污染物的重量和类别，建立处理端动力需求与供能端能源供给系统的自动化信息传输通道，实时动态调整供能，提高能源有效利用率，实现降碳减排的目标。

二是建设生产工艺全流程数字化优化体系。应用云计算、人工智能等数字技术创建生产工艺全流程优化提升体系，依托超结构优化、线性/非线性规划模型等开展智能分析，实现计划、调度、装置、控制四个层面的智能协同，提升全流程的生产效率。如石化行业构建临氢装置操作优化模型，开展氢夹点分析降低产氢成本，构建加热炉多热负荷区域操作优化模型降低燃料气耗，达到降低燃烧碳排放的目标。

三是提高重点工艺环节的数字化绿色化水平。利用人工智能、高性能计算、分子管理、物联网等技术，建立机理模型，最大化收集、分析、求解、利用实时数据，探索低能耗与低碳排的工艺技术路线，预测并降低重点生产过程的碳排放强度。如煤炭行业基于透明空间地球物理和多物理场耦合，优化风险判识、监控预警等处置功能，实现时空上准

确安全可靠的智能少人（无人）安全精准开采。

4.生产末端融合：推动向数字循环经济转型

以构建数字化产业循环体系为抓手，以发展智能再制造产业为重点，以加强循环经济数字化治理为保障，推动工业向数字循环经济转型，实现资源高效集约利用。

一是构建全链条数字化循环体系。通过完善废旧物资回收网络、建设循环产业大数据平台，打通废旧资源回收、拆解、再利用全产业链条信息，促进废钢铁、废旧汽车、废旧动力电池、废旧家电等资源规模化、清洁化利用，提高废旧资源回收利用效率。如家电行业打造数字化回收平台，推动废旧家电的“收、储、运、拆、用”各环节可溯可查，大幅提升废旧家电的可利用价值。

二是发展智能再制造产业。结合工业智能化改造和数字化转型，加强智能再制造共性关键技术攻关及产品推广，减少原材料使用、初加工等环节的能源消耗和碳排放。中国石油济柴动力再制造分公司对“报废”发动机进行再制造，产品可广泛用于石油、冶金、矿山等领域，与新机生产相比，以再制造的方式生产发动机，可节约成本 30%至 50%、节能 60%、节材 70%。

三是加强循环经济数字化治理。制定完善循环经济标准体系，加强废旧物资回收、处理、再利用等环节的全流程追踪和监管，规范废旧资源回收利用，防止以次充好、以旧充新。如重庆市建立报废机动车回收数字化管理平台，实现机动车报废、拆解等全流程数字化监管，2022

年 1-4 月，全市拆解报废机动车 77429 台，较去年同期增长 97%，有效防止报废机动车逾期使用和非法拆解。

5. 供应链融合：构建数字化绿色供应链

以数字化基础设施共建共享为基础，以数据流动共享为核心，畅通供应链沟通与管理。

一是构建数字化供应网络。应用互联网、云计算等数字技术建设互联互通的供应网络体系，替掉传统的线性序列式供应链，推动供应链协作互联互通、高频高效。如电力行业通过建设智能电网、开展输电全景智慧监控等数字化手段，构建起新能源智能网络，从而有效提高输电配电效率，解决“弃风”“弃光”等问题。

二是搭建数据共享、资源动态优化配置平台。供应链数据共享平台可实时监测上游原材料/零配件供应情况以及下游产品需求信息，可有效缓解库存及产能过剩情况。如汽车行业通过搭建行业级数字化平台，打通产品、研发、采购、生产到销售的全价值链资源，灵活动态调整库存、产线，实现柔性生产、产供销协同。

三是推动碳排放数据供应链传递和绿色管控。通过供应链管理平台，将上游原材料、元器件、零部件企业碳排放数据向下游传递，为下游企业开展产品碳足迹和碳排放追踪提供高质量数据基础。如汽车行业从上游原材料、零部件起开展碳足迹追踪管理、核算、认证，建立全生命周期碳排评价体系，从而实现全生命周期的绿色管控。

四、工业数绿融合展望和推进策略

我国工业数字化绿色化融合发展已经取得了诸多发展成效，“十四五”时期，在“碳中和、碳达峰”的背景之下，我国工业将迎来更加广阔的市场空间和新的发展机遇。针对前期积累的老问题和未来可能出现的新问题，应进一步发挥我国集中力量办大事的制度优势和超大规模的市场优势，不断营造有序发展环境、夯实数字化基础、提升融合应用能力、强化要素保障水平、完善产业发展生态，着力破除制约融合发展的桎梏，推动工业数字化绿色化融合发展持续向纵深迈进。

（一）融合发展未来展望

推动生产更智能、更低碳。工业是智能绿色制造的关键与核心，对保持经济和社会持续健康发展具有重要作用。数字化、绿色化融合是未来智能绿色制造的必然趋势，利用数字化技术实现生产信息的数字化与集成化、物流配送的集约化与智能化、交易结算的便捷化与移动化，以提高生产效率；利用绿色化技术，赋予产品环境、资源、能源属性，增强产品的核心竞争力，以提高企业生产的环保效率、资源和能源利用效率；利用大数据准确分析市场绿色化需求导向，制定个性化实施方案，差异化营销措施，以提升企业服务水平与客户满意度。深度融合数字化绿色化，打造智能绿色制造的场景与应用，增强客户体验，丰富服务内涵。

带动供应链更敏捷、更绿色。充分利用先进的绿色化技术和数字化手段，将生产、加工、销售、售后等全链条信息整合起来，加强信息管理的透明度，完善绿色化供应链管理体系，建立高效的绿色化供应链智能管理平台。供应链的绿色化、智能化管理实现了原材料资源、能源消耗量的可追溯，提升了供应链在线运作效率，以最快的速度满足客户的需求，为推动工业数字化和绿色化深度融合，加快工业领域双碳目标的实现奠定坚实基础。未来绿色化、智能化的供应链能够从供应商、生产商、平台、消费者的各个主体，到包含不同渠道、多个环节，以及国内国外众多部门、地区和国家的运作环节进行持续优化，必然在对工业技术革新、行业发展、产业结构等方面产生巨大影响。

拉动价值链更高端、更创新。创新化、高端化是引领工业发展的重要引擎，也是加快数字化和绿色化深度融合的重要力量。当前工业领域技术更新加快，仅仅依靠传统生产模式已经难以满足工业领域的高速发展，如何发展产业链以满足技术、产品、服务需求是未来亟需解决的问题。依靠创新化、高端化模式推动数字化和绿色化全产业链的融合研发，通过精准供需匹配、消除冗余环节、降低中间损耗提升运作效率，促进技术创新、制度创新、知识创新，实现生产高端、管理高端、营销高端的模式变革，激发工业创新、高端发展活力。数字化和绿色化的充分融合，未来将从市场需求、创新创意、研发设计、柔性制造、快速响应、快捷物流、用户体验等

多方面多维度创新经营业态与商业模式。

（二）夯实数字化基础水平

继续加快数字基础设施建设。持续开展 5G、大数据中心、工业互联网等数字基础设施的建设推进工作，并将碳排放目标纳入相关工作的考核范围之内，加快形成规模化的发展态势，为工业数字化绿色化融合发展提供关键的基础设施支撑能力。鼓励企业利用新型的通信、网络等技术，对企业内部进行数字化改造，并通过优化内部管理流程和组织架构等，加快实现数字化转型目标，提升信息化、数字化、智能化发展水平。

增强产业链供应链可控水平。全面梳理工业数字化绿色化融合发展涉及到的相关产业链及可能存在的短板，以产业基础再造工程为重要抓手，聚焦产业薄弱环节，开展关键技术和产品的工程化攻关。支持龙头企业做优做强，培育一批具有生态主导能力的产业链“链主”企业，鼓励企业优化管理模式、创新利益分配机制，带动中小企业的绿色化转型，促进大中小企业融通发展。

着力提升技术创新引领能力。支持遴选一批绿色制造基础和前沿技术，加强产学研协同合作，面向绿色制造亟需的重大关键技术、原材料、工艺、系统等开展集中攻关。加大绿色制造相关技术和产品研发的资金支持，通过国家重大科技专项、成立创新科技中心、绿色制造工程中心等方式推动先进数字化技术与绿色制造技术的融

合创新。通过支持在重点行业和领域建立一批优势突出的众包、众创、众筹、众扶等平台，集聚利用全球数字化绿色化技术与人才，加快新技术新产品新模式的跨越式发展。

（三）提升融合应用能力

着力培育市场应用需求。在加快建立完善绿色设计、绿色制造、绿色产品与服务等动态标准体系基础上，同步研究制定绿色产品目录、绿色制造企业目录、绿色设计与服务企业目录，指导企业有序部署配置数字化绿色化融合应用系统。配套实施绿色制造产品政府采购办法，鼓励在各类政府工程、PPP 模式中采购绿色制造原料和产品。利用互联网多渠道、多平台宣传推广绿色制造产品优势，推动越来越多的消费者认可并采购绿色制造产品。

持续激发企业发展内生动力。鼓励有能力的企业在深入理解“碳达峰、碳中和”目标的基础上，将可持续发展纳入“一把手工程”，由企业一把手直接负责，制定相关的发展战略、进行顶层规划等，从组织、文化、人才等各层面引导企业绿色化发展和低碳化的发展路径。大力支持绿色设计、绿色原料、绿色生产、绿色工艺等的创新和推广应用，通过试点示范、重大工程等方式支持绿色制造先行技术和企业加快发展。加快建立分行业产品设计、生产、运输、消费、回收等全生命周期的绿色足迹监测体系，持续提升并强制推行每个环节的绿色环保标准，倒逼企业加快向绿色制造方向演进。

加快推动重点行业的应用发展。优先选择高耗能行业开展数字化绿色化融合试点，探索利用物联网、大数据、云计算等先进数字化技术提升绿色制造水平、生产绿色产品的新路径，在模式成熟基础上向全行业推广应用。在能源利用、余热余压回收利用等领域，应用物联网、大数据等先进数字化技术优化提升能源资源利用水平，探索将云计算、物联网、智能工业机器人、3D 打印等先进技术与制造技术高度集成，实现虚拟设计、智能排产、智能诊断等减少资源消耗、提升生产效率水平的新模式、新业态。

（四）持续完善政策环境

多措并举规范发展秩序。强化环境保护、资源节约等相关法规约束，严格节能监察和环境监管执法，营造公平竞争环境。开展工业数字化绿色化融合创新型产品的检测认证服务，建立工业数字化绿色化融合发展领域从基础研究、技术开发、试验示范到检测认证全过程的试验能力开放共享机制，提高新型产品的可靠性与安全风险防范能力，加快产品的研发周期与迭代更新速度。鼓励行业主管部门利用互联网平台开展制造业耗材、耗电、耗能，及材料、能源再回收再利用数据监测，定期对行业建立绿色制造能力进行监测评估，适时指导企业进一步开展工业数字化绿色化融合发展能力建设。

建立多元化资金支持渠道。充分发挥财政资金引导作用。丰富财政资金的投入方式，利用有限的财政资金设立绿色制造基金，撬

动无限的社会资本投资绿色制造，以便充分发挥财政资金引导作用、扩大财政资金作用范围、提升财政资金对绿色制造的支持效果。提升对从事绿色制造企业研发环节的财政补贴比例，增强相关企业研发活动水平。加大研发回收环节资金投入，需要政府投入更多的资金弥补回收短板。灵活调整财税支持政策，继续落实高新技术企业所得税优惠、研发费加计扣除等税收优惠政策，激励民间对工业数字化绿色化融合的投资和实践。支持有能力的地方或企业成立产业发展引导基金，支持数字化绿色化融合企业做大做强。进一步完善资本市场的融资和再融资机制，鼓励有能力的企业通过科创板、创业板上市，发行绿色债券等，充盈企业发展资本。

大力培养具备综合能力的相关人才。加强工业数字化绿色化融合人才需求预测，联合各级智库及求职平台，加强近年绿色制造领域职业供需研究，建立预测模型科学预测绿色制造人才需求；动态发布绿色制造岗位需求信息，支撑绿色制造人才政策的科学编制与精准实施。规范工业数字化绿色化融合人才培养方式，制定岗位能力要求并发布人才职业能力标准，建立碳管理、绿色设计、环保技术、环境咨询与技术服务等细分岗位的认证体系。丰富工业数字化绿色化融合人才培养途径，鼓励绿色标杆企业参与高校“新工科”建设，积极推进绿色制造职业教育和培训，支持更多企业和职业院校将绿色制造纳入职业培训范围，鼓励有能力的企业通过建设实训基地等加强培训，完成技能转换。

着力培育数据要素市场激发数据要素活力。加快完善数据治理相关的法律法规，加快数据确权、流转、共享、安全等相关领域的制度建设，指导和监管行业及组织的数据治理，为发挥数据价值奠定良好的法律法规基础。积极稳妥开展行业层面的数据要素市场的分级分类管理，支持产学研用多方协同，研究制定并执行各行业内的数据流通、交易等环节的行业规范、协议标准等，并探索在各行业内开展数据要素价值评价评估，探索建立规范化的数据要素价值评估体系。引导企业建立健全企业内部数据管理机制，通过订立商业合同、建立共赢生态等途径加强与产业链上下游企业的数据共享水平，积极拓展相关数据的典型应用场景和开发相关解决方案，提升数据应用水平。

（五）加快完善产业生态体系

加快培育工业数字化绿色化融合解决方案的供应商。在重点行业支持一批具有人才、技术、资金等优势的企业，集聚整合各领域的融合技术、管理与模式，推动形成解决绿色设计、绿色制造、绿色消费、绿色回收与处理等全生命周期问题的数字化综合服务提供商，面向各行业各领域提供工业数字化绿色化融合综合服务。

支持产业联盟、行业组织做大做强。鼓励联盟内企业通过共建测试床、共享应用案例等建立风险共担、利益共享的合作机制，支持企业以碳达峰、碳中和为目标，充分借助外部力量强化协同能力，

快速提升企业绿色化发展能力。以企业或产业组织为主体，加强与国际相关机构和组织的交流与沟通，在关键标准研制、技术专利研发、最佳实践共享等领域加强合作，提升我国企业“团体战”能力的同时，也提升我国在工业数字化绿色化融合领域的国际影响力、知名度和话语权。

大中小企业融通发展，融链成圈。大企业凭借自身优势，在数字化绿色化协同转型过程中，仍需不断发挥示范引领作用，加大数字技术和绿色低碳技术创新投入，对上下游开放资源，构建数字化绿色化生态体系，带动产业链供应链降低碳排放水平。聚焦产业链上下游、供应链前末端、大中小企业协同减碳，行业性龙头企业秉持“打造零碳供应链”理念，以绿色标准牵引带动上下游中小企业加快工业设备联网、申请获得绿色认证等。中小企业要积极参与区域的工业低碳行动和绿色制造工程，渐进融入产业园区、产业集群绿色转型，共同推动区域落后产能循序化解。中小企业要紧跟龙头企业的步伐，尽快踏上数字化绿色化“同频共振”之路。

（六）构建数字化碳管理体系

数字技术能够大幅提高整体经济效率，围绕双碳目标，建议从政府、行业和企业三个层面构建数字化碳管理体系，数字减碳、数字管碳和数字碳评价是该体系三个核心功能。

数字减碳方面，各级政府部门和行业协会要做好示范引导、政

策支持、服务和监督等方面的工作。加强示范引领，探索形成一批可复制、可推广的数字减碳解决方案和创新应用。一是强化顶层设计。采用“自上而下”的开展方式，明确领域方向、工作任务、遴选要求等内容，厘清各行业利用数字技术开展碳中和的着力点和典型应用场景。二是开展项目遴选。遴选一批工业等领域先导试点应用，推进多维度数字减碳应用和服务创新。三是完善政策支持。合理推动试点项目与其他重点工程、科技规划的衔接，鼓励地方政府对试点项目给予土地、资金、用电等政策支持，降低推行阻力。

数字管碳方面，从地方到中央各级政府部门应建立数字化碳管理公共服务平台，企业内部的数字化碳管理系统可与地方政府的公共服务平台对接，地方政府的平台再与部委平台对接，实现自下而上企业能源消耗、碳排放以及产品碳足迹等数据的自动核算以及上传上报，提高数据统计核算的效率、准确度、可信和可追溯，摸清碳家底，切实加强企业层面数据采集监测，及时开展地方层面数据统计，统一实施国家层面数据核算，鼓励企业在政府部门平台上开展企业碳排放信息披露，减少数据造假问题，增强碳排放数据的透明度和可靠性。

数字碳评价方面，在碳排放数据相对准确可信的基础上，才能开展区域、企业或产品的低碳比较，结合科学合理的评价方法，并运用大数据、云计算等数字技术，可快速精准评价区域、企业或产品在相同或不同区域、行业或产品类别中低碳的程度和水平，提升

评价的效率。在企业 and 行业侧，数字碳评价助力企业快速了解自身和行业情况，针对不足积极采取有效措施减少碳排放。在政府侧，数字碳评价也是碳减排、绿色制造等监管工作的重要抓手。需要设计合理的评价体系，运用数字手段为企业碳减排或绿色制造精准画像、赋分评级，通过“碳效码”、绿色制造“绿码”加强宣传普及和监督管理。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-68094556

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

