

“数字+算法”驱动“未来制造” 转型创新研究

史占中 刘新文 张涛 冯春风 刘香港^①

【摘要】数字经济时代，“数据”成为生产要素，“算法”成为生产工具，“数字+算法”也已成为重要的生产力，对经济社会各个领域都将产生深远影响。“未来制造”作为中国未来产业前瞻性部署的六大新赛道之一，如何以“数字+算法”为核心引擎，形成数字新质生产力，驱动“未来制造”转型创新已成为重要议题。本文基于“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的发展趋势，深入剖析以“数字+算法”推动“未来制造”转型创新的驱动机制及所面临的挑战。基于智能工厂、数字孪生和智能供应链等实践案例分析，从技术、组织和政策三个维度探讨“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的对策和建议，以期为中国未来制造业高质量发展提供决策参考。

关键词：数字+算法；未来制造；转型创新

一 引言

当前，中国已构建起全世界规模最大，门类最齐全、最完整的制造业体系。2023年，

【作者简介】

史占中 上海交通大学安泰经济与管理学院教授、行业研究院“人工智能+”行业研究团队负责人、数字经济行业社群班责任教授。研究方向为数字经济和战略管理。

刘新文 博士生，上海交通大学行业研究院“人工智能+”行业研究团队成员。研究方向为人工智能与数字经济。

张涛 博士生，上海交通大学行业研究院“人工智能+”行业研究团队成员。研究方向为人工智能与数字经济。

冯春风 博士生，上海交通大学行业研究院“人工智能+”行业研究团队成员。研究方向为人工智能与数字经济。

刘香港 博士生，上海交通大学行业研究院“人工智能+”行业研究团队成员。研究方向为人工智能与数字经济。

中国制造业增加值占全球 GDP 比重约为 30.0%,规模连续 14 年位居全球第一(见图 1)。

但中国制造业“大而不强”“全而不精”的问题积重难返,如制造业自主创新能力不强、关键核心技术“卡脖子”、产业基础不牢、资源约束趋紧、要素成本上升、产品附加值低、“低端锁定”、产品国际竞争力不足等问题突出。同时,也面临“高端回流”“低端转移”等外部冲击和挑战。因此,如何推动制造业高质量发展,抢占未来产业发展制高点,成为中国学术界和业界广泛关注和亟待解决的问题。

数字经济的兴起,为中国制造业由“制造大国”向“制造强国”转变提供了难得的发展机遇。“新质生产力”的提出,也为中国制造业未来发展明确了主攻方向。2024 年 1 月工信部等七部委联合发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》,更是将“未来制造”作为中国未来产业前瞻部署的六大新赛道之一,这为中国制造业向先进制造、智能制造转型创新提供了行动指南。



图 1 中国制造业增加值占全球比值

(数据来源: 证券时报)

同时,数据、算力、算法已成为数字经济和新质生产力的重要支撑。数据作为新质生产力数字化发展的新型生产要素,算力作为数字经济时代的新型生产力,算法作为现代科技发展的基础和新的生产工具^[1]，“数字+算法”的结合通过提升技术创新水平,实现商业模式创新,促进资源优化配置,进而驱动制造业向智能制造、生物制造、纳米制造等“未来制造”发展,受到政府部门的高度重视。基于此,本文探究技术的迅猛发展,数字孪生技术也得到“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的问题与趋势、机遇与挑战,航空航天、能源、医疗和城市规划等并提出相应的对策建议,这对以未来产业为核心,加快形成新质生产力,促进制造业向高端化、智能化、绿色化发展,实现经济高质量发展具有重要意义。

二 “未来制造”的转型创新：势在必行、时不我待

当前，“数字+算法”已经快速融入生产、分配、流通和消费等经济运行的各个环节，深刻改变着生产、生活方式和社会治理模式。以发展“智能制造、生物制造、纳米制造、激光制造、循环制造”为核心的“未来制造”将成为我国制造业抢占全球制造业新一轮制高点，提升国际竞争力的重要抓手。“数字+算法”驱动以新一代信息技术与先进制造技术深度融合为主线的“未来制造”转型创新发展呈现出新趋势。

（一）数字孪生技术推动虚实融合

随着大数据、云计算、区块链、物联网和人工智能等新一代信息技术的迅猛发展，数字孪生技术也得到了快速发展，并被广泛应用在制造、航空航天、能源、医疗和城市规划等领域。数字孪生技术是通过构建物理对象的虚拟镜像，利用传感器数据驱动物理对象与虚拟对象同步运行，实现在数字空间内对物理对象状态监控、分析预测、逆时复现等过程的先进技术^[2]。简而言之，就是在虚拟世界中，构建物理实体的“克隆体”，还原现实世界中的场景，从而支持人们对物理实体进一步了解、分析和优化决策。数字孪生关键技术包含建模技术、仿真技术、数据交互技术和虚拟现实技术等^[3]，具有互操作性、可扩展性、实时性、保真性和闭环性等特征^[4]。而上述技术正是“未来制造”有望突破的关键核心技术。

2023 年全球数字孪生相关软件和服务规模将达 175 亿美元，2027 年将达到 735 亿美元，2022-2027 年的复合年增长率将达到 60.6%^[5]。根据中国信通院的数据，我国半数以上地级行政区已开展数字孪生城市相关建设。全国数字孪生规模累计已达近 600 亿元，2023 年新增项目金额达 140 亿元以上^[6]。

在制造业领域，数字孪生技术主要运用在制造业的产品设计、生产制造和安全维护等环节。在产品阶段，通过数字孪生技术对产品的物理属性和行为数据进行建模分析，提高产品设计效率和质量；在生产制造阶段，可利用数字孪生技术对生产设备、制造过程、生产工序进行模拟，进而改善工艺流程，提高生产效率和管理效能；在安全维护阶段，利用数字孪生技术、大数据技术进行仿真建模和数据分析，实现对设备性能的准确检测、智能诊断和故障预警，进而确保生产线的稳定运行^[7]。数字孪生技术推动虚实结合，成为“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的趋势之一。

（二）人机协作模式重塑生产方式

人机协作是“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的典型模式。具体而言，人机协作是在工业生产环境中，人类工作人员与自动化设备或机器人在同一工作空间内，协同完成

任务的一种新型交互模式，强调的是安全、高效和灵活的工作流程设计。人机协作的本质特征体现在互补优势、动态适应性和任务灵活性上，旨在最大化整体作业效率，减少人为差错，并降低劳动强度。因而，被广泛运用在智能制造、生物制造、纳米制造等“未来制造”领域。

在“未来制造”领域，人机协作模式将重塑制造业生产方式。一是人机协作模式可以极大地提高生产与制造的效率和质量。在人机协作中，协作机器人通常采用轻质设计、柔性结构和智能控制算法，能够自适应地与人类协作，实现高效、安全和灵活的生产制造。二是人机协作模式可以降低生产成本及缓解人力资源短缺问题。通过对协作机器人的运用，不仅可以减少对劳动力的需求，进而减少劳动成本，缓解人力资源不足问题，同时也可以降低劳动者的劳动强度。

（三） 柔性制造系统实现快速响应

前瞻性布局“未来制造”带动了柔性制造、共享制造等模式的推广。柔性制造系统则是整合了计算机控制、自动化设备、灵活工艺和智能管理等技术，可以根据不同的生产需求自动调整生产线配置，优化工艺流程，进而实现个性化、小批量的加工生产^[8]。“数字+算法”的推广应用，将有效打破时间和空间限制，实现对产品需求和市场变化的快速响应，驱动“未来制造”向分布式研发、个性化定制、小批量生产和智能化服务转变。柔性制造成为“未来制造”提升企业竞争力的优势，以及驱动制造业由订单驱动向智能生产转型的切入点和突破口，因而具有广阔的前景。

一方面，柔性制造系统可以配置多种类型的机器设备，通过智能化制造流程与在线监测控制系统实时调整加工参数和工艺流程，以满足不同零部件工艺需求，提高生产效率和产品质量^[8]。另一方面，柔性制造系统具有较强的产品定制能力，企业通过实时采集数据和智能化生产调度系统，能够根据客户的个性化需求灵活调整生产线，实现产品小批量、个性化生产。这种个性化定制的灵活性显著提高了企业对市场变化的应对能力，满足了消费者对个性化产品不断增长的需求^[8-9]。例如在汽车制造行业，通过调整参数和更换部件，汽车制造商可以在同一条生产线生产不同型号的汽车；在生物医药行业，企业可以提高药品研发的灵活性和生产效率，满足不同批次和规模的需求。

柔性制造系统与人工智能、物联网等新一代信息技术的结合，将进一步加快推动智能制造的转型创新。通过智能感知、自适应控制等技术的应用，柔性制造系统可以减少资源浪费，降低对环境的影响，通过节能减排、循环利用等措施，实现绿色生产，满足社会对可持续发展的需求，推动制造行业向更加环保的方向拓展^[10]。

（四） 智能算法促进资源优化配置

“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的核心就在于是否拥有精准的数据和优化的智能算法。智能制造是传统制造业生产链智能化和价值链创新的关键，算法则是重要手段之一。智能算法通过对制造业数据的动态感知、高速传输、精准分析，从而提升制造业数智化水平^[1]。一是智能算法的应用可以实现对生产调度的优化，通过在生产流程中应用精准的算法模型，实现对整个生产流程的全面控制，根据市场需求和生产环境变化，及时调整生产，提高资源配置效率和生产线整体生产效率。二是智能算法的应用可以实现对生产过程的实时监控，利用大数据、云计算、机器学习等数字技术，对生产过程中产品质量参数进行实时监控，及时发现不合格产品，提高产品质量。三是智能算法的应用可以为企业提供决策支持。市场环境复杂多变，要求企业能够根据市场需求和环境变化，迅速做出决策，优化资源配置，及时调整生产^[1]。

当前，中国的智能算法技术已覆盖制造业多个细分行业，但国务院发展研究中心《算法经济指数与政策研究》报告显示，我国智能算法主要集中在计算机、通信和其他电子设备制造业、电气机械和器材制造业等行业，应用的广度和深度还存在较大的差异。

三 “数字+算法”驱动“未来制造”转型：从“制造大国”到“智造强国”的嬗变

“未来制造”作为先进生产力的代表，是引领制造业未来发展方向的重要产业形态，为“数字+算法”的应用提供了丰富的场景，“数字+算法”则为中国“未来制造”转型创新提供重要的驱动力。当前，中国在“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新方面具有以下优势。

（一）新一代信息技术与制造业融合的战略推进

中国政府一直致力于积极推进新一代信息技术与制造业融合。党的十六大报告中就明确提出，以信息化带动工业化、以工业化促进信息化，走新型工业化的道路，并首次提出“两化融合”，工业化与信息化融合由此拉开序幕。党的十七大提出了“大力推进信息化与工业化融合”。党的十八大要求推动信息化和工业化深度融合。随后，党的十九大进一步提出“加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合”。为加快推进新一代信息技术与制造业融合发展，提升中国制造业数字化、网络化和智能化水平，中国相继出台《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》（2016年）、《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》（2017年）和《关于深化新一代信息技术与制造业融合发展的指导意见》（2020年）等系列文件。

《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》提出了两化融合发展的总体目标、5个方面的分目标，以及5项主要任务、5项重点工程和5个方面的保障措施，新一代信息技术与制造业融合发展战略部署愈加全面深化。上述政策文件和战略部署的持续推进，为中国以“数字+算法”驱动“未来制造”提供了政策保障，并取得了突出的成效。2023年，中国关键工序数控化率和数字化研发设计工具普及率分别达到62.2%和79.6%，较2019年分别提高了12.1和9.4个百分点（见图2）。累计建成62家“灯塔工厂”（见图3），占全球总数的40%，全年新增11家，占全球新增总数的52.4%。累计培育421家国家级智能制造示范工厂。



图2 全国工业企业关键工序数控化率、数字化研发设计工具普及率

（数据来源：工业和信息化部）

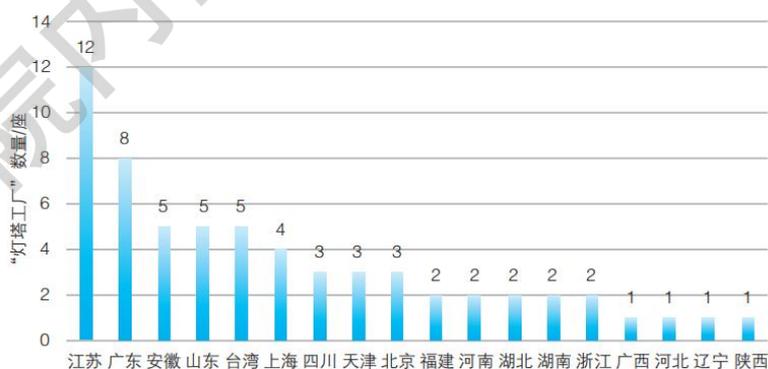


图3 中国“灯塔工厂”地区分布

（数据来源：证券时报）

（二）完备的工业体系与日益完善的数字设施

一方面，当前中国工业体系形成了“全、多、大”的独特优势，为中国“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新提供了施展空间。“全”即体系全。按照联合国对现代工业体系的分类，所有工业包括 39 个工业大类、191 个中类和 525 个小类，中国工信部的数据显示，中国已经拥有 41 个工业大类、207 个工业中类和 666 个工业小类，成为全球唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家。“多”即品种多。在全球 500 种主要的工业产品中，中国有 220 多种产品产量位居全球第一。“大”即规模大。据工信部的数据，2023 年，中国全部工业增加值达到了 39.9 万亿元，占 GDP 的比重为 31.7%；制造业增加值占 GDP 比重为 26.2%，占全球比重约 30%。

另一方面，中国构建了较为完善的数字基础设施，为中国以“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新奠定了坚实的基础。根据《数字中国发展报告（2023 年）》报告，截至 2023 年年底，中国累计建成 5G 基站 337.7 万个，全国在用数据中心标准机架超过 810 万架（见图 4），算力总规模达到 230EFlops，居全球第 2 位，具备千兆网络服务能力的端口达到 2 302 万个，移动物联网终端用户占移动网络终端连接数的比重达到 57.5%。5G 应用融入 74 个国民经济大类，工业互联网覆盖全部 41 个工业大类，全国已创建示范应用项目超 8 000 个，5G 工厂 300 个，具有一定区域和行业影响力的综合型、特色型、专业型工业互联网平台数量大幅增加，重点平台连接设备超过 9 600 万台（套）。

（三）充满活力的创业生态促进了技术创新与应用

中国创新创业整体上蓬勃发展，不仅创业数量大、创投活跃，而且创业质量、创业生态也逐步向好。在创业数量方面，2023 年，中国新设经营主体 3273 万户，日均新设企业 2.7 万户。在创业质量方面，截至 2024 年 4 月，中国拥有独角兽企业 369 家，独角兽企业数量占全球独角兽企业数量的 1/4，主要集中在人工智能和集成电路领域，且主要分布在北上深广杭等城市。在工业软件方面（见图 5），2023 年，全国工业软件企业注册数量超过 30.83 万家，较 2022 年增长近三分之一。此外，为营造良好的创业生态环境，中国出台了《国务院关于大力推进大众创业万众创新若干政策措施的意见》等系列政策，激发中国创业主体的活力和潜力。大量的创新创业企业成为中国技术创新与应用的主要场所。

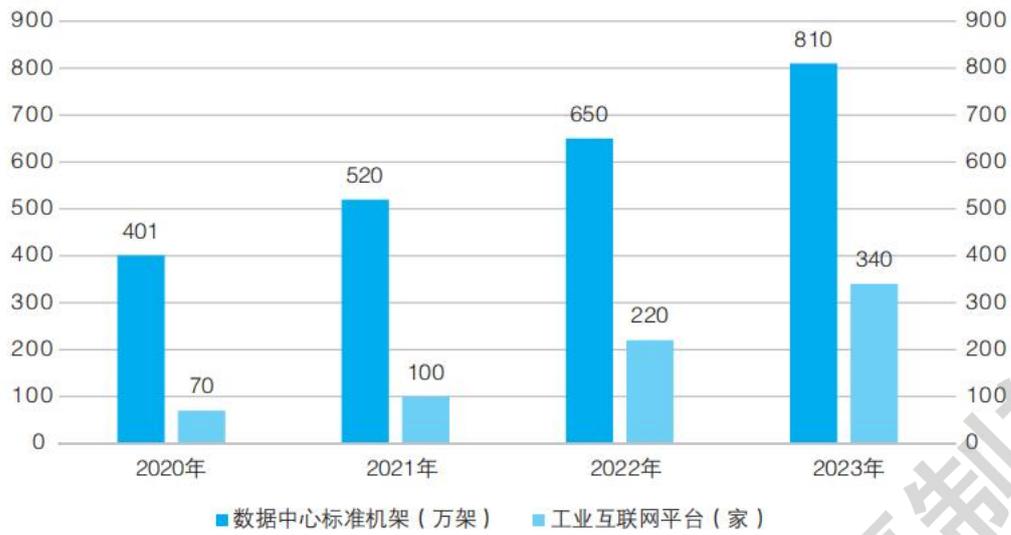


图 4 2020-2023 年数据中心标准机架和工业互联网平台数量

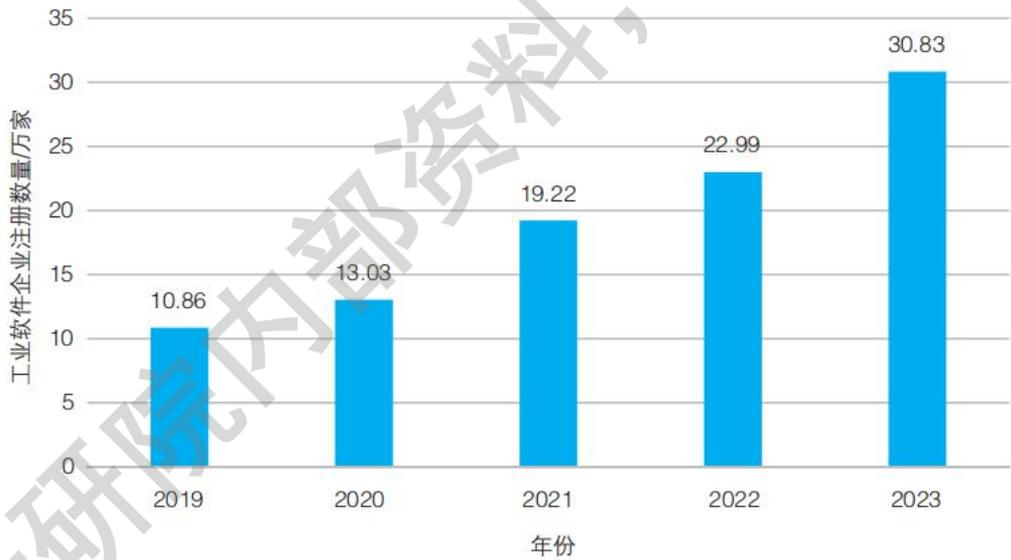


图 5 全国工业软件企业注册数量

(数据来源: 中商产业研究院)

（四）海量工业数据为算法优化提供了有力支撑

正如前文所述，中国具备完备的工业体系，是全球唯一一个拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家，在生产端拥有丰富的场景优势。几乎在所有工业领域，中国企业都是世界前沿技术和设备的最大用户。随着制造业数字化、网络化、智能化的不断演进，中国工业机器人、数控机床、智能生产线、智能工厂等先进应用加速普及，其所产生的研发设计、生产制造、销售服务等海量数据，为算法的训练、优化提供了数据支撑。

根据《数字中国发展报告（2023年）》，中国数据产量保持快速增长态势。2023年，全国数据生产总量达32.85ZB（1个ZB约等于10万亿亿字节），同比增长22.44%。截至2023年底，全国数据存储总量为1.73ZB。2023年移动互联网接入总流量为0.27ZB，同比增长15.2%。金融、互联网、通信、制造业等领域的数据需求较大且交易量增长较快。这些海量企业级用户场景和需求数据，将极大地促进中国本土企业针对客户需求开展算法技术训练优化和产品迭代创新，缓解和突破“卡脖子”问题，实现创新驱动发展。此外，数据交易市场不断升温（见图6），2022年以来新挂牌数据交易场所达到48个。2023年，上海数据交易所、贵阳大数据交易所、深圳数据交易所的交易额分别突破11亿元、20亿元、50亿元。活跃的数据交易市场为激活和挖掘数据要素价值奠定了坚实的基础。

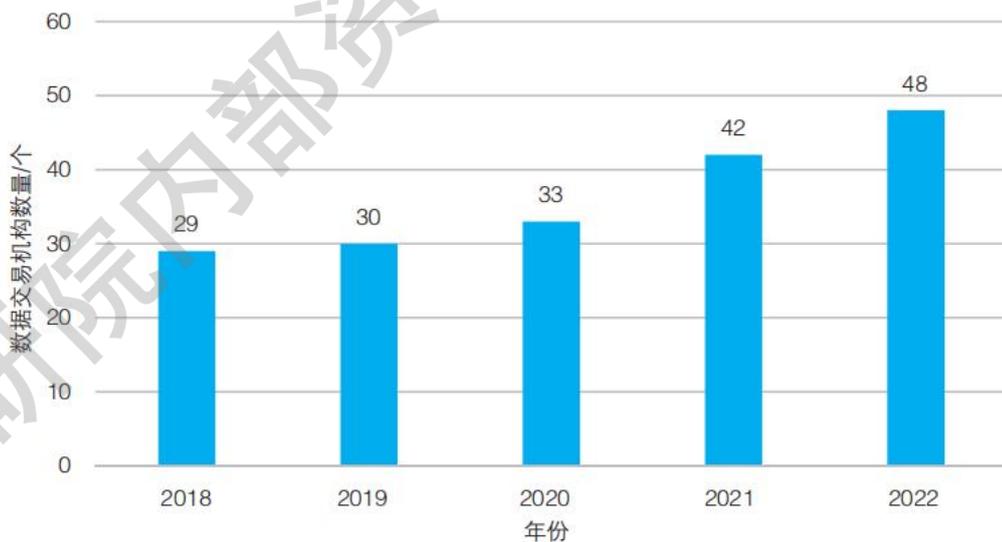


图6 全国数据交易机构数量

（数据来源：中国信息通信研究院）

四 “数字+算法”驱动“未来制造”转型创新：问题与挑战

中国具有完备的工业体系，且日益完善的数字设施、海量工业数据能为算法优化提供支撑等，这给“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新带来了独特优势，但所面临的挑战也不容忽视。

（一）核心领域进口依赖严重

核心技术与高端装备的进口依赖已成为“未来制造”发展的一个重要瓶颈。这一挑战主要体现在以下三个方面。

一是高端装备严重依赖进口。被称为“工业母机”的机床是“未来制造”的基础，但国内高端机床市场绝大部分一直依赖进口，这制约了中国制造业在高精度、高效率、高稳定性加工方面的能力提升。“制造业皇冠顶端的明珠”--工业机器人的部分核心部件同样仍依赖进口。高端装备的进口依赖不仅增加了生产成本，也使得中国制造业在全球价值链中处于不利地位。

二是关键领域存在短板。中国在集成电路、操作系统、工业软件、智能装备等方面面临严重短板。以高端电子装备制造领域为例，芯片制造材料、电子设计自动化（EDA）软件、极紫外（EUV）光刻机等关键技术和设备严重依赖进口。类似的问题也存在于机械制造、航空航天、高端医疗设备等领域，亟待加强自主创新。这些关键领域的短板不仅限制了中国制造业的发展潜力，还可能对国家安全和经济独立性产生深远影响。

三是产业控制力不强。外资企业在中国的投资规模虽然在不断扩大，但呈现出独资化趋势。外资企业掌握核心技术，向中国输出的多为生产和供应链的低端环节。这使得中国企业难以通过合资方式获得先进技术和管理经验，削弱了对产业的控制力。这种局面不利于中国未来的制造业的长期发展和技术积累，也可能导致关键产业的话语权逐渐流失。

（二）工业软件生态发展滞后

工业软件与工业 App 这一领域面临的挑战主要体现在四个方面。

一是核心技术自主可控度低。国产工业软件的核心技术相对落后，产品通用性和稳定性较差，难以应对复杂的应用场景。高端市场仍由外国企业产品垄断，这使得中国工业软件在关键领域缺乏话语权和竞争力。

二是研发投入与人才储备不足。工业软件的研发周期长、投入大、回报周期长，导致许多企业不愿意或无力进行大规模研发投入。同时，行业面临严重的人才短缺问题。既懂工业

又懂软件开发的复合型人才稀缺，高端人才流失严重，而现有的人才培养体系又难以满足行业快速发展的需求。

三是产业生态薄弱。目前，中国尚未形成产学研结合的工业软件生态体系。软件企业和工业企业之间缺乏紧密的联合机制，难以形成良性互动。市场更青睐成熟的国外工业软件，导致国产软件的产业化和商业化进程受阻，难以在实际应用中得到验证和改进。

四是基础支撑不足。工业软件的发展依赖于工程知识、数学、物理、计算机等基础学科，但这些领域在中国的发展相对滞后。跨学科融合不够，难以为复杂工业软件的开发提供必要的理论和技术支撑。此外，知识产权保护意识薄弱，不利于企业增加研发投入和推动创新。

（三）数据孤岛制约亟待解决

数据孤岛问题是制约“未来制造”转型创新的一大阻碍，主要表现在以下三个方面。

一是缺乏统一标准，严重限制了产业的规模化发展。工业数据流通交易价值化面临严重的“标准难”问题，产业链上下游企业普遍采用不同厂商的软件系统，数据格式和接口标准不一致，阻碍了顺畅协同。即便通过格式转换等处理，数据关键信息的丢失也难以避免。此外，各机构组织的数据标准缺乏整体规划和协调，严格统一的标准尚未建立，容易造成数据名称不规范、语义模糊等问题，严重影响数据的互通性和可用性。

二是数据流通与交易机制亟待完善。目前，非标准化的场外交易仍是数据交易的主导模式，各交易平台规则不一，缺乏跨区域、跨行业的统一标准和规范。尽管在数据标识、接口和存储方面已有相关标准，但其系统性和全面性不足，特别是在数据管控、数据血缘等技术标准方面仍存在显著空白。

三是数据产权制度建设严重滞后。目前，对数据确权、流通、共享等核心问题尚无明确的规定。特别是在工业数据领域，专门立法仍属空白。国家层面缺乏体系化的数据产权制度政策，现有政策也缺少配套实施方案和具体标准规范，对工业数据流通及价值化途径的政策引导明显不足。

（四）网络安全风险日益严峻

网络安全风险成为“未来制造”面临的一个关键挑战，主要体现在以下三个方面。

一是网络攻击日趋频繁。工业大数据作为“未来制造”时代中制造业企业的核心资产，容易成为不法分子的目标。Cloudflare 于 2024 年 7 月发布的应用安全报告显示，目前有近 7% 的互联网流量被视为恶意流量。DDoS 攻击仍然是针对 Web 应用程序的最普遍威胁，93% 的 Bot 流量可能是恶意的。仅仅在 2024 年第一季度，Cloudflare 平均每天拦截 2 090 亿次网络威胁，比去年增长 86.6%。

二是数据类型复杂、业务系统交织。随着“未来制造”的推进，企业在产品设计、生产、物流、销售等各个阶段都会产生大量数据。同时，企业通常使用多套业务系统，如办公自动化系统、企业资源计划系统、制造执行系统、客户关系管理系统等。这些系统之间数据互相重叠、可相互访问，使得企业难以针对不同级别数据采取差异化的安全措施，这不仅增加了合规风险，数据关系梳理的难度，也提高了数据泄露的风险。

三是核心数据保护不足。“未来制造”的技术架构复杂，安全隐患多，包括组件漏洞、IT/OT 融合、供应链复杂性、老旧工业控制系统、不安全协议使用等多方面挑战。部分制造业企业可能拥有关乎国家科技实力的设计和工艺等核心数据，其与监管部门就核心数据的协同管理工作进度较慢。

五 “数字+算法”驱动“未来制造”转型创新：模式与路径

（一）无锡小天鹅：“数字+算法”赋能的智能工厂模式

无锡小天鹅电器有限公司是中国家电行业的领军企业之一，在洗衣机制造领域占据重要地位。面对日益激烈的市场竞争和消费者对个性化产品的需求，无锡小天鹅制定了“智能家居+智能制造”的“双智”战略。

在数字化研发方面，无锡小天鹅建立了以 PDM 系统为核心的设计生态。PDM 系统集成了 CAD（计算机辅助设计）、CAE（计算机辅助工程）、CAM（计算机辅助制造）等设计软件，提高了数据共享度和设计效率。同时，公司采用应用数字化工艺管理（DPM）系统进行工艺数据的线上编制和流转，并通过仿真技术的应用，使产品研制周期缩短了 30%以上。此外，公司基于模块化理念，推出了个性化 BOM 选配系统，为客户定制需求提供了快速响应的解决方案。

在智能生产管理方面，无锡小天鹅建立了基于“云-边-端”架构的监督控制和数据采集（SCADA）系统，实现了设备数据的实时采集和分析。公司还应用数字孪生技术，构建了工厂、生产线和设备的虚拟模型，用于生产状况监测和优化。这些举措使得生产过程更加透明化，设备利用率显著提升。

为实现数据驱动的柔性制造，无锡小天鹅启动了“632”项目，集成了六大运营系统（PLM、ERP、MES、APS、CRM、SRM），打通了从研发、采购到生产、销售的全价值链。基于这一集成平台，公司创新性地推出了“T+3”快速交付模式，将订单交付周期从原来的 28 天缩短至 3 天，大幅提升了市场响应速度。

在大数据应用方面，无锡小天鹅开发了“地动仪”大数据分析平台，通过对互联网洗衣

机运行数据的分析，为产品优化和精准营销提供决策支持。公司还建立了覆盖全价值链的数据分析体系，通过“智造驾驶舱”实现了数据可视化和实时监控，为管理决策提供了有力支撑。

算法创新是无锡小天鹅智能制造转型的关键驱动力。公司在智能排产、预测性维护、质量控制和能源优化等方面开发了一系列先进算法。例如，智能排产算法能够根据订单情况和生产资源动态优化生产计划；预测性维护算法通过分析设备运行数据，预判可能发生的故障，降低了设备非计划停机率。

通过这一系列“数字+算法”驱动的智能制造实践，无锡小天鹅取得了显著成效：生产效率提高 20%以上，产品研制周期缩短 25%以上，且运营成本和良品率均降低 20%以上。因此，无锡小天鹅建立了快速响应市场需求的能力，增强了企业竞争力。

无锡小天鹅的智能工厂提供了如下启示：首先，向“未来制造”转型需要明确的战略引领，将数智化战略与业务战略紧密结合。其次，数据是“未来制造”的核心驱动要素，企业应建立贯穿全价值链的数据采集、分析和应用体系。最后，智能制造转型是一个持续的过程，需要企业在组织结构、人才培养等方面进行相应的变革。

（二）中南智能长泰机器人：数字孪生技术引领“未来制造”新范式

中南智能长泰机器人有限公司是中国智能制造领域的创新先锋，在汽车制造和工业机器人应用方面具有丰富经验。随着制造业从高速发展向高质量发展转变，中南智能长泰意识到必须通过数智化转型来提升核心竞争力，因此制定了以数字孪生技术为核心的“未来制造”战略。

在数字孪生技术研发方面，中南智能长泰提出了独特的“六位一体”模型。这一模型融合了虚拟实体、数据交互等六个关键维度，成功将物理实体相似度推至 99.9%的高度。公司自主研发了多元异构数据处理技术，不仅兼容 30 余种公共协议和规范，还巧妙解决了长期困扰业界的异源数据统一处理难题。公司通过与华为和中国移动合作引入 5G 技术，显著增强了数据采集和处理能力，为数字孪生系统的实时运行奠定了坚实基础。

为构建完整的数字孪生环境，中南智能长泰在湖南建立了工业 4.0 创新中心，汇聚了 500 多套尖端软硬件设施，构成了一个完整的数字孪生生态系统。公司还与湖南大学、中国科技大学等高等学府展开产学研合作，在数据处理和实时技术等前沿领域进行深入探索，极大地推动了数字孪生技术的创新进程。

在智能生产管理方面，中南智能长泰开发的基于工业互联网的数字孪生系统，实现了生产线与虚拟孪生体之间的实时数据交互和精准控制。公司构建的协同工业规划和软件开发平

台整合了 110 种应用场景和数千个实际项目经验，为客户提供了全方位、高度定制化的智能制造解决方案。

中南智能长泰的数字孪生技术在多个领域取得了显著成效。在东风汽车的应用中，该技术成功优化了 21 种混流生产线，实现了虚实环境的无缝对接和闭环控制。在奔驰内饰零部件生产中，数字孪生系统则显著提高了产品换型效率和产能规划的准确性，实现了工艺知识的数字化沉淀和传承。通过这一系列“数字+算法”驱动的数字孪生实践，中南智能长泰不仅提升了自身竞争力，也为客户创造了显著价值。中南智能长泰的数字孪生智能制造实践提供了以下启示：首先，前沿技术创新需要与行业实际需求紧密结合；其次，构建完整的数智化基础设施和人才体系对技术落地至关重要；再次，算法创新是实现智能决策和优化的核心；最后，产学研合作可以有效推动基础研究和应用创新的融合。

（三）安得智联：“数字+算法”驱动的智能供应链转型之路

安得智联作为美的集团的智慧物流板块，在城市配送业务领域占据重要地位。面对订单碎片化、小批量化的趋势和服务要求的不断提升，安得智联制订了以“数字+算法”驱动的智能供应链为核心的转型战略。

算法技术驱动的智能调度。安得智联的智能调度系统以尖端的运筹优化算法为核心，与公司自主研发的运输管理系统完美融合。这种集成不仅实现了订单的智能分配，更是对运力资源利用效率的全面提升。系统的独特之处在于其多维度考量：从装载体积到串点数量，从运输距离到合线路线，再到车型拓展，每一个细节都经过精心优化，使得调度效率和准确性得到前所未有的提升。

数据赋能的精准预测与智能决策。在大数据时代，安得智联充分利用 TMS 系统积累的海量业务数据，构建了强大的需求预测模型。这不仅为区域和 B 端客户提供了精准的订单需求预测，更为集货和发货时间点的确定提供了科学依据。公司创新性地将运力资源池信息与实时导航数据相结合，实现了订单的智能组合和线路的自动优化，将人工调度的经验转化为可复制的数字智慧。

构建全国布局智能调度网络。安得智联的目标不止于单点突破，而是构建了覆盖全国 8 个片区、136 个配送中心的庞大智能调度网络。这一网络的意义不仅在于其规模，更在于它彻底改变了传统城配业务对人工经验的依赖。借助这一系统，即使是新入职的调度员也能快速掌握复杂的调度工作，大幅提升了整个行业的运作效率和标准化水平。

城配“长合车”系统的算法创新。在不断追求创新的道路上，安得智联开发出了城配“长合车”智能调度系统。这一系统的独特之处在于其全局优化的视角，不仅提高了效率，更实

现了显著的成本节约。2022 年第一季度，该系统在全国范围内的成功推广，标志着安得智联在智能调度领域迈出了决定性的一步。

通过这一系列“数字+算法”驱动的智能城市配送实践，安得智联取得了显著成效：采用智能调度系统的配送中心单位运输成本较 2021 年同期大幅下降了 4.6%，满载率提升了 4 个百分点。尤其值得一提的是，东部地区的配送中心在应用该系统后，方千米（1 方土运送 1 千米）成本同比降低 4.34%~13.47%，不仅为公司创造了可观的经济效益，还显著提高了前线员工的工作效率。

安得智联的智能供应链展示了技术创新和数据驱动决策对效率提升的关键作用，证明了先进算法可直接转化为经济效益。智能系统不仅实现了标准化操作，减少了对个人经验的依赖，还凸显了全局优化的重要性。这些经验既适用于物流行业，也为其他领域的智能供应链建设提供了有价值的参考。

（四）酷特智能：“数字+算法”驱动服装行业转型的典范

酷特智能股份有限公司（前身为红领集团）是一家从传统服装制造企业成功转型为 C2M（顾客对工厂，customer to manufacturer）产业互联网平台的典型代表。通过运用“数字+算法”驱动的创新模式，酷特智能彻底颠覆了传统服装行业的生产方式，实现了“用工业化的效率和成本制造个性化产品”的突破，为服装行业的数字化转型树立了标杆。

打造以数据为核心的智能工厂。酷特智能通过自主研发建立了版型、工艺、款式、BOM 四大数据库，包含了百万亿量级的数据，可以满足 99.99% 的个体个性化定制需求。酷特智能的智能工厂通过数据驱动，每一步生产指令都由数据大脑控制，实现了规模化按需生产和零库存管理。

构建算法驱动的智能设计与量体系统。酷特智能自主研发了智能设计打版系统和智能裁床，实现了电脑自动制版和智能裁剪。同时，通过 AI 智能量体技术，只需 7 秒即可完成对人体 19 个部位 22 项尺寸数据的自动采集，大大提高了定制效率。这套标准化方法使得没有相关经验的人经过简单培训就能完成精准量体，彻底改变了传统定制模式中对老裁缝的依赖。

升级 C2M 商业模式的数字化平台。酷特智能构建了完整的 C2M 产业互联网平台。在 B 端，为全球服装品牌商、创业者和设计师提供从量体、研发设计到智能制造、物流配送的全产业链数字化解决方案。在 C 端，通过“红领 REDCOLLAR”品牌为消费者提供个性化定制体验，并实时捕捉市场需求数据，不断完善平台功能。

完善数字化治理体系。酷特智能建立了独特的“酷特智能数字化治理体系”，通过规范化、标准化、体系化、数字化、平台化建设，实现了去领导化、去部门、去科层、去审批、

去岗位等扁平化管理。这一体系直接去掉了 80%的生产管理岗位，使企业效率提升了 20%，同时也提高了 ESG（环境、社会和公司）治理水平。

通过“数字+算法”驱动的创新实践，酷特智能实现了从“0 到 1”的突破，成功解决了传统服装行业面临的高库存、低效率等痛点问题。公司不仅实现了“1 件起订，7 天交付”的柔性生产能力，还做到了“一人一版、一衣一款、单量单裁、一件一流”的极致个性化定制。

酷特智能为整个服装行业乃至制造业的数字化转型提供了可复制、可推广的成功范例。酷特智能的实践证明，通过数字技术与先进算法的深度融合，传统制造业能够实现从“红海厮杀”到“蓝海新生”的跨越式发展，推动中国制造向中国智造的转变。

六 “数字+算法”驱动“未来制造”转型创新：思路与出路

随着全球制造业进入新的转型时期，“数字+算法”成为推动“未来制造”的核心引擎。本文从技术策略、组织策略和政策策略三个方面，提出了若干“数字+算法”驱动“未来制造”转型创新的对策建议，以期推动“数字+算法”在制造业中的应用，提升中国制造业的创新能力和综合竞争力。

（一） 技术层面

1. 关键技术选择与研发

数字化基础设施是“未来制造”转型创新的基石。构建高效、可靠的数字化基础设施，首先需要大力发展高速宽带网络和 5G 通信技术，确保制造企业能够高效收集、传输和处理海量数据。其次，工业物联网作为数字化基础设施的重要组成部分，需在制造业中得到广泛应用。通过工业物联网，设备与设备之间可以实现互联互通，数据的实时监控和采集将大幅提升生产效率。此外，还需建立云计算和边缘计算平台，以支持大规模数据存储和高效计算能力。通过这些平台，可以更好地管理和分析数据，为智能制造提供有力支撑。

在“未来制造”转型创新过程中，工业软件的生态系统至关重要。工业软件覆盖了从设计、仿真、生产到管理的全流程，能够提升制造过程的智能化水平。首先，需要发展自主可控的工业软件，特别是在 CAD、CAE、CAM 等方面，减少对国外软件的依赖。其次，构建开放的工业软件平台，促进软件之间的互操作性和集成能力。通过开放平台，企业可以灵活选择和组合不同的软件工具，提升生产效率和产品质量。最后，工业软件的开发和应用还需注重安全性，防范网络攻击和数据泄露，确保制造系统的稳定运行。

2. 技术整合与协同创新

大数据平台是实现智能制造的重要基础。建设大数据平台，整合不同来源的数据，可以实现数据的统一存储、管理和分析，为智能决策和精准制造提供有力支持。首先，需建立统一的数据采集标准，确保各类设备和系统的数据能够无缝接入大数据平台。其次，开发高效的数据存储和处理技术，以应对海量数据的存储和快速处理需求。通过数据湖和数据仓库等技术，企业可以高效管理和分析生产数据。最后，应用大数据分析技术，如机器学习和深度学习，挖掘数据中的潜在价值，为生产优化、故障预测和质量控制提供决策支持。

人工智能技术与先进制造技术的深度融合，是制造业未来发展的重要方向。首先，结合人工智能和自动化技术，打造智能化生产线，实现生产过程的自动化、智能化和柔性化。例如，通过机器人完成焊接、装配、搬运等重复性高的工作，提高生产效率和精度。通过人工智能算法优化生产线的调度和控制，构建柔性制造系统，从而能够快速响应市场需求的变化，进行小批量、多品种的生产。其次，通过人工智能技术分析设备运行数据，实现设备的预测性维护，降低设备故障率和维护成本。例如，通过安装传感器，实时采集设备的运行数据，如振动、温度、压力等参数，利用人工智能算法分析设备的健康状态。最后，人工智能技术还可以与增材制造（3D 打印）、柔性制造等先进制造技术相结合，实现个性化定制和快速响应市场需求。

（二） 组织层面

1. 组织结构变革与人才培养

跨学科团队建设是推动技术创新和管理创新的重要方式。首先，组建由工程师、数据科学家、IT 专家等多学科人才组成的团队，开展跨学科项目，鼓励员工参与跨部门的创新活动，如黑客马拉松、创新竞赛等。其次，应注重协同工作和跨部门合作，打破传统的组织边界，实现技术和业务的深度融合。通过跨学科团队，企业可以在技术研发、产品设计和生产管理等方面实现协同创新，提升整体创新能力。最后，推行远程办公和弹性工作时间，给予员工更多的工作自由度，采用项目制管理，根据项目需求组建临时团队，打破部门壁垒。

数字化人才培养是制造企业转型创新发展的关键。首先，企业应建立完善的培训体系，根据企业发展战略和业务需求，制订具体的培训目标和计划。通过系统的培训，提高员工在大数据分析、人工智能和智能制造等领域的知识和技能，并建立培训效果评估机制，通过测试、问卷调查等方式，了解培训效果，并根据反馈持续改进培训内容和方法。其次，数字经济时代应探索多样化的培训方式，组织面对面的培训课程和工作坊，提供实战演练和经验分享的机会。最后，要建立企业内部的学习社区，促进员工之间的知识分享和协作，并设立学习奖励机制，激励员工积极参与培训和学习活动，提升整体培训效果。

2. 企业数字素养

企业文化是推动“未来制造”转型创新发展的重要软实力。首先，企业应鼓励员工大胆尝试新技术和新方法，允许一定范围内的失败，鼓励员工积极参与数字化转型，激发创新思维和创造力。其次，企业应重视知识分享和团队合作，建立内部知识管理系统，促进经验和知识的共享和传承。最后，推动全员塑造数据文化，强调数据在决策中的重要性，培养员工的数据分析和应用能力。

数字化思维是企业领导层和管理层推动“未来制造”转型创新发展的核心理念。首先，企业高层领导要亲自参与数字化转型，理解和重视数字化转型的重要性，将数字化理念融入企业战略和日常管理。其次，企业管理层应重视数据驱动的决策方式，通过数据分析和洞察，制定科学合理的决策，提高企业的决策效率和精准度。最后，建立科学的绩效考核和激励机制，将员工的创新成果和数字化应用成效纳入考核指标，通过公平和透明的绩效考核，激发员工的工作积极性和创造力。

（三） 政策层面

1. 政府政策与法规支持

数据共享机制是推动“未来制造”产业链协同和创新的重要基础。首先，政府应制定和实施数据共享相关的政策和法规，明确数据开放的范围、标准和责任，保障数据的合法、合规使用。其次，建立国家级或地区级的数据开放平台，集中发布公共数据和企业共享数据，为企业和研究机构提供便利的访问渠道，推动数据驱动的创新和发展。

网络安全和隐私保护是“未来制造”转型创新发展的重要问题。首先，政府应制定和实施网络安全和隐私保护相关的法律法规，明确各方在网络安全方面的责任和义务，确保在数字化转型过程中，企业的用户隐私得到有效保障。其次，企业应建立健全的网络安全管理体系，包括网络安全标准、应急预案、责任追究等内容，保障网络安全的整体水平，并建立专门的网络安全监管机构，负责监督和管理企业和机构的网络安全工作。

2. 产业链协同与政策引导

技术标准化和规范化是推动“未来制造”转型创新发展的重要手段。首先，政府应牵头制定和推广智能制造的技术标准和行业规范，确保不同企业和系统之间的兼容性和互操作性。通过标准化工作，促进技术的推广应用的产业的协同发展。其次，企业应积极参与标准制定工作，结合自身实践经验，提出有针对性的技术规范和建议。最后，政府应支持标准化和规范化的实施，提供政策和资金支持，推动标准的落地和应用。

链长制政策是提升“未来制造”产业链协同效率的重要机制。首先，政府应明确重点产

产业链的“链长”单位，统筹协调上下游企业的协同发展，推动技术创新和资源共享，解决产业链发展中的共性问题。其次，政府应搭建产业链协同的在线平台，提供信息交流、技术对接、供需匹配等服务。

参考文献：

- [1] 任保平, 豆渊博.数据、算力和算法结合反映新质生产力的数字化发展水准 [J].浙江工商大学学报, 2024 (3): 91-100.
- [2] 郭磊, 张红旗, 程五四, 等.基于数据驱动的数字孪生技术研究现状与展望 [J].机械, 2023, 50 (7): 1-10.
- [3] 范帅, 相茂利, 张恩亮.数字孪生技术在智能制造领域中的应用 [J].造纸装备及材料, 2024, 53 (4): 86-88.
- [4] 中国电子技术标准化研究院, 树银互联技术有限公司.数字孪生应用白皮书 (2020 版) [R].中国电子技术标准化研究院, 2020.
- [5] Digital Twin Market Size, Share, and Trends [EB/OL]. (2023-06-15) [2024-07-01].<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>.
- [6] 中国信息通信研究院, 中国互联网协会, 中国通信标准化协会.数字孪生城市白皮书 (2023 年) [R].中国信息通信研究院, 2023.
- [7] 赵瑶瑶.数字孪生技术在工业制造中的应用研究综述[J].中国设备工程, 2024(3): 33-35.
- [8] 赵兰欣, 李冰.柔性制造系统在机械制造中的应用与发展趋势[J].造纸装备及材料, 2024, 53 (4): 83-85.
- [9] 王树青, 罗和平.基于 HMC63H 卧式加工中心的阀体柔性制造单元研制 [J].组合机床与自动化加工技术, 2022 (5): 168-169+173.
- [10] 冯昊天, 王红军, 常城, 等.基于数字孪生的柔性生产线状态感知 [J].电子测量与仪器学报, 2021, 35 (2): 17-24.
- [11] 段炳德, 胡豫陇.充分发挥“算法+”在推动数实融合中的关键作用 [J].重庆理工大学学报 (社会科学), 2023, 37 (12): 1-6.

【作者介绍】

史占中, 上海交通大学安泰经济与管理学院教授、博士生导师, 上海交通大学行业研究院“人工智能+”行业研究团队负责人、上海交通大学产业经济研究中心主任。曾任上海交

通大学先进产业技术研究院副院长，兼任中国科学学与科技政策研究会常务理事、《中国科技论坛》编委等。

研究方向为数字经济、绿色经济、战略管理等。近年来在国内外核心期刊上发表论文累计 90 余篇，主持完成国家自然科学基金重点重大课题 4 项、国家及省部级以上课题 20 余项、企业横向咨询课题 30 余项，撰写《新产业革命背景下我国产业转型升级研究》《企业战略联盟》等学术著作 5 部，参编《管理经济学》等 MBA 教材 3 部。研究成果《人工智能赋能实体经济发展研究》《中小企业集群化成长与科技园区集约化发展》,得到政府有关决策部门的高度重视，多次荣获上海市决策咨询研究成果奖。