

人工智能培育制造业新质生产力的路径研究

宋子豪

中国中车集团有限公司 北京 100036

【摘要】人工智能作为第四次工业革命的核心驱动力，正在重构全球制造业的底层逻辑与发展范式。本文论述了人工智能在制造领域的战略价值、技术体系与应用实践。通过机器学习、计算机视觉、数字孪生等关键技术，人工智能已深度渗透研发设计、生产制造、运维服务等核心环节，实现了压缩设计周期、提升质检效率和设备可利用率等突破性进展。研究揭示，人工智能通过“数据-算法-算力”三位一体赋能体系，推动制造业向自感知、自决策、自优化的智能范式转型。但当前仍面临数据孤岛、算力瓶颈、人才短缺等挑战，需通过技术攻坚、标准建设与产教融合构建协同发展生态。本文尝试为制造业智能化转型提供理论框架与实践参考，指明新质生产力的培育路径。

【关键词】人工智能；制造业；智能制造

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.073

引言

当前，全球正经历以“人工智能+”为核心驱动的第四次科技革命与产业变革。中国互联网络信息中心日前发布的第56次《中国互联网络发展状况统计报告》显示，2024年我国人工智能产业规模突破7000亿元，连续多年保持20%以上的增长率。2025年4月，总书记在中共中央政治局第二十次集体学习时强调：“面对新一代人工智能技术快速演进的新形势，要充分发挥新型举国体制优势，坚持自立自强，突出应用导向，推动我国人工智能朝着有益、安全、公平方向健康有序发展。”这一论述深刻揭示了人工智能作为新型工业化核心动能的战略地位。

制造业作为国家经济命脉，其智能化转型已呈现三大特征：其一，技术突破加速产业重构。以GPT、Gemini、DeepSeek等为代表的工业大模型通过“低成本、高性能”路径，正全面贯通研发设计至生产制造全链路，有力推动数控机床、激光雷达等关键领域核心技术的自主跃升，引领产业结构深度变革。其二，生产范式发生根本性变革。全国已建成3万余家基础级智能工厂、1200余家先进级智能工厂、230余家卓越级智能工厂，随着人工智能质检系统等技术的深度应用，检测精度实现了跨越式提升，生产效率获得大幅跃升，机器视觉、数字孪生等新兴技术共同构建起具备“自感知-自决策-自优化”能力的智能化生产新体系。其三，产业链竞争力全面提升。我国已先后培育1557家制造业单项冠军企业和1.46万家专精特新“小巨人”企业。这些智能驱动型企业依托人工智能技术，成功突破关键领域核心技术瓶颈，智能装备、新能源汽车等规模化、高水平的先进制造业集群在长三角、粤港澳等重点区域蓬勃发展，逐步构建起覆盖技术基础层、软件框架层、智能模型层的完备产业生态体系。这场由人工智能引发的认知革命，正通过“算力+算法+数据”三位一体赋能体系，推动制造业从要素驱动转向创新驱动，为培育新质生产力、重塑全球产业链竞争格局提供决定性支撑。

1 人工智能在生产制造中的关键技术

1.1 机器学习与深度学习

机器学习与深度学习是智能制造的核心驱动技术，通过数据驱动的模型优化生产流程。机器学习中的监督学习用于质量预测和故障诊断，无监督学习通过聚类分析设备状态数据实现异常检测，强化学习则优化动态生产调度与能耗控制。深度学习凭借卷积神经网络（CNN）和生成对抗网络（GAN），在图像识别领域实现高精度缺陷检测，并通过时序模型预测设备剩余寿命，支持预测性维护。

1.2 计算机视觉与机器视觉

计算机视觉通过图像处理与模式识别实现制造过程的智能化监控。其核心技术包括高分辨率图像采集、特征提取算法及基于深度学习的实时目标检测。在制造场景中，机器视觉系统可完成高精度零件尺寸测量、表面缺陷分类，并引导机械臂实现精准装配。三维视觉技术结合点云数据处理，支持复杂工件的形貌重建与公差分析。工业应用面临光照干扰、高速运动模糊等挑战，需通过多光谱成像与自适应滤波算法优化鲁棒性。

1.3 边缘计算与数字孪生

边缘计算通过本地化数据处理降低传输延迟，支持10ms级实时决策。在设备端部署轻量级AI模型，实现振动频谱分析与异常预警；数字孪生构建物理实体的虚拟映射，整合IoT传感器数据与物理仿真模型，通过OPC UA协议实现多源数据融合，关键技术包括实时渲染引擎驱动的动态仿真，以及基于强化学习的数字孪生自优化算法。云边协同架构实现模型分布式训练与推理，如云端训练预测性维护模型，边缘端执行推理任务，带宽占用降低90%。

1.4 自然语言处理与知识图谱

自然语言处理（NLP）通过BERT等预训练模型解析设备日志中的实体关系，实现故障描述结构化提取；结合意图识别

技术将客户需求转化为工艺参数。知识图谱基于本体建模（OWL 语言）构建设备-工艺-材料关联网络，利用 TransE 算法抽取隐性关系，结合图神经网络（GNN）实现故障根因推理。工业知识管理需解决跨领域术语对齐问题，采用文本+传感器数据的小样本学习与多模态数据融合，提升图谱完备性。动态更新机制通过流式计算实时整合新数据，支持供应链风险评估与智能决策。

2 人工智能在制造领域中的核心应用场景

在制造业全生命周期数字化转型进程中，人工智能技术已深度渗透研发设计、工艺规划、生产制造、设备运维、客户服务、供应链管理等全价值链环节，构建起覆盖产品全生命周期的智能化体系。其中，研发设计、生产制造和运维服务作为制造业价值创造的三大核心环节，通过数据闭环和智能迭代形成协同效应，构成了人工智能技术赋能制造业的主战场。

2.1 研发设计

在制造业研发设计环节，通过神经算子、分布式计算、复数神经网络、多模态数据融合等人工智能技术，融合跨学科工程原理与历史实验数据，自主生成多维度设计方案。基于生成式对抗网络构建虚拟仿真环境，可对产品结构强度、空气动力学、热力学性能等参数进行百万量级的自动化模拟测试，快速识别设计缺陷并推荐拓扑优化方案。通过多目标优化算法，AI 系统能动态平衡材料成本、制造工艺可行性和产品性能指标，将传统迭代周期压缩数倍，显著提升复杂产品的创新设计效率。

高速动车组传统空气动力学仿真需要采用精细化建模、高精度物理模型和离散格式，几何处理耗时费力、计算网格量大、计算周期长、仿真软件使用门槛高、历史数据利用率低。新一代空气动力学智能化仿真平台融合几何信息神经算子和傅里叶神经算子，运用积累的数值仿真、风洞试验、动模型试验、线路试验等海量多元化流场数据对深度学习神经网络进行训练和优化，开发高速动车组空气动力学智能化仿真大模型，替代传统的流场仿真求解，可使几何模型人工处理时间由 6 小时缩短至 1 小时，气动载荷计算省略了计算网格离散及流场求解过程，计算时间由天级缩短至秒级，相同工况整体仿真计算效率提升 30 倍。高压涡轮盘等航空发动机关键部件的传统结构设计与优化场景中，过度依赖高保真的结构静力学、动力学、疲劳寿命分析等多物理场耦合仿真，计算过程同样需要精细的网格划分和复杂的材料本构模型，导致单次仿真计算周期长达数天甚至数周，严重制约了设计空间的探索与优化效率。针对这类场景开发的新一代智能化结构设计与优化平台应通过复数神经网络与多模态数据融合技术，深度融合材料科学知识、制造工艺参数、历史台架试验数据及高保真仿真结果，构建起对复杂力学行为的深层理解。系统能够自主生成一系列在轻量

化、强度及疲劳寿命之间实现平衡的创新性拓扑构型。利用生成式对抗网络构建的虚拟仿真环境，可替代传统的有限元求解器，对生成的设计方案进行百万量级的自动化工况模拟，快速甄别应力集中区域并预测裂纹萌生风险，从而快速识别设计缺陷并推荐拓扑优化方案。

2.2 生产制造

人工智能在缺陷检测、质量预测和过程优化等生产制造场景中，依托计算机视觉和工业物联网实现全流程感知，通过数字孪生技术构建产线动态模型。自适应控制算法实时调节设备参数，在毫秒级响应中保持工艺稳定性，使良品率大幅度提升。异常检测模型通过振动频谱、温度梯度等多模态数据融合，提前预测设备故障风险，实现从被动维修到预测性维护的转变。深度强化学习驱动的柔性排产系统可动态解析订单变化、设备状态和供应链波动，自主生成最优生产计划。

电子制造领域，PCB 制造商采用自适应视觉算法替代传统人工目检，模型通过多尺度特征融合技术识别焊点虚焊、线路断裂等隐性缺陷，同时结合热成像数据建立三维缺陷图谱，使漏检率显著下降^[1]。该系统在生产线上实时输出缺陷定位报告，同步触发分拣机械臂自动剔除不良品，形成检测-决策-执行的闭环质量控制。钢铁连铸场景中，企业通过实时采集结晶器振动频率、二冷区温度梯度等数百维参数，建立铸坯缺陷预测模型^[2]。该模型融合冶金机理规则与神经网络，动态推演气孔、偏析等缺陷的形成概率，当预测到质量异常时立即反向追溯关键工艺参数，并生成参数优化方案反馈至连铸机控制系统，实现质量问题的源头防控。在流程优化维度，特种材料工厂部署的智能决策系统通过强化学习算法持续优化生产节奏，系统实时解析设备状态、环境变量与订单优先级等多源数据，自主生成最优的浇铸速度曲线与冷却策略。特别是在订单紧急切换场景中，系统能在分钟内重新规划全产线设备参数组合，使关键设备的空转率大幅降低。这种柔性排产能力使产线在保证工艺稳定性的同时，对市场波动展现出极强的适应性。

2.3 运维服务

智能运维平台运用时间序列分析构建设备健康指数模型，通过边缘计算节点实时解析传感器数据流，实现关键部件剩余寿命的精准预测。基于知识推理引擎的故障诊断系统，可自动关联设备运行日志、维护记录和故障知识库，显著提升问题定位准确率。自然语言处理技术赋能智能客服机器人，理解客户的多模态运维请求，自动生成维修方案并调度服务资源。迁移学习算法持续吸收新设备运行数据，形成自进化的设备管理知识体系，推动服务模式从定期巡检向自主决策的认知型运维演进。

在网络设备制造中，智能运维系统融合故障树分析和神经网络模型，实时采集交换机运行参数如温度和端口流量，实现

故障的快速定位和精确诊断，例如利用卷积神经网络处理时序数据预测硬件异常，并结合数据挖掘技术识别潜在故障模式，优化维护决策。在光伏设备制造领域，多模态机器学习整合电流、电压等传感器数据与环境因素，部署边缘计算节点进行本地数据处理，实现对组件热斑或逆变器故障的早期预警，减少停机时间并提升系统稳定性^[3]。对于大型机电设备制造，如在水电站应用中，智能运维平台构建感知-传输-分析-决策的全流程架构，通过传感器网络监控设备振动和温度参数，结合知识图谱关联历史故障案例，自动生成预防性维护工单，并利用数字孪生技术仿真故障演化路径，优化资源调度策略。在电力设备制造中，迁移学习算法实现跨产品线知识转移，将故障诊断模型适配至新设备，通过分析文本日志和音频特征进行智能分类，形成自进化知识体系；同时，自然语言处理技术赋能智能客服机器人，理解操作员的多模态请求并自动生成维修方案，高效调度服务资源。这些应用不仅降低了维护成本和非计划停机风险，还通过预测性维护延长设备寿命，推动运维模式从被动响应向主动决策演进，全面提升制造系统的可靠性和效率。

3 人工智能在制造领域中的挑战

3.1 数据治理与标准化难题突出

制造数据分散于设备、系统和供应链中，协议标准不统一导致整合困难；复杂工业环境中的传感器失效、设备故障等问题造成数据噪声和缺失现象普遍，同时高价值工业数据面临网络攻击威胁，而多方主体参与下的数据确权边界模糊，数据资产化路径尚未成熟。

3.2 技术与基础设施瓶颈显著

目前国内大部分高端 AI 芯片仍然依赖进口，大模型能力与国际领先水平存在代差，算力需求激增与区域“算力挤兑”矛盾凸显，且 5G、云计算、物联网等技术的系统集成复杂度高，跨平台协同能力不足导致智能化改造成本攀升。

3.3 人才结构性短缺问题严峻

既精通人工智能技术又熟悉制造工艺的复合型人才储备

不足，人才缺口超 500 万，地域分布集中于东部发达地区，传统制造业员工缺乏人工智能应用能力，现有培训体系与数字化转型需求脱节，人才供需失衡制约技术落地。

3.4 成本与应用场景存在双重局限

人工智能系统部署涉及硬件购置、算法开发、数据标注等高昂成本，中小企业难以承担，现有应用多集中于质量检测等标准化场景，复杂工艺环节因算法“黑箱”特性难以深度渗透，生产关键环节仍依赖人工经验。

3.5 战略与标准化建设滞后

企业缺乏与业务深度融合的 AI 战略规划，数据采集、算法评估等标准体系尚未健全，跨行业协作机制缺失导致技术复用率低，系统性框架的缺位阻碍规模化应用。

3.6 法律与伦理挑战加剧

需应对数据安全与个人信息保护法规的合规压力，跨境数据流通受限增加全球化运营难度，算法偏见和决策不可解释性可能引发生产安全风险，技术应用面临伦理争议与法律追责挑战。

4 结语

人工智能与制造业的深度融合标志着工业文明迈向新阶段。通过重构研发设计、生产制造和运维服务的全价值链，人工智能正在塑造智能生产的新生态。面对全球产业链竞争，中国制造业正在把握战略机遇，加速技术创新与智能基础设施建设，推动数据要素市场化改革以破除数据流通壁垒，并培育跨领域的复合型人才梯队。然而，当前人工智能与制造业的融合仍面临诸多挑战，包括数据治理不足、技术瓶颈以及中小企业转型成本等问题。破解这些难题需建立多方协同机制，完善标准体系，并聚焦关键技术的突破。未来，随着颠覆性技术的演进，制造业将向自进化产线、智能供应链等新形态迈进，实现向“智造强国”的跨越。唯有统筹创新驱动与安全发展，方能在全球产业变革中塑造中国制造的核心竞争力。

参考文献：

- [1] 何嘉泳,陈芳,张绮婷,等.基于注意力机制和改进 YOLOv10 的 PCB 缺陷检测方法[J].现代信息科技,2025(14).
- [2] 余炯.基于大数据挖掘的连铸质量人工智能模型的研究[J].冶金自动化,2025(S1).
- [3] 江颖,关艳飞,刘磊.基于人工智能的光伏发电系统故障诊断与预测技术研究[J].中国设备工程,2025(14).