

人工智能与工业的深度耦合技术路径： 从云端认知到具身重构

朱云轩¹ 黎 菁¹ 彭拓宇²

¹(清华大学五道口金融学院, 北京 100083) ²(上海产研技术研究院有限公司, 上海 200233)

〔摘 要〕 工业转型是新一轮工业革命水到渠成的自然环节, 而人工智能时代的到来使“物联网”意义上的工业生产力革新变为“数据+算法+传感器+行为 Tokenization+控制系统”的新工业革命。人工智能将工业从物联网含义转变为“AlphaGo+OpenAI”的具身人工智能含义, 使得智能工业时代处于 Grokking 前夜。AI 能够深度加速工业转型, 也能够直接重新构造为智能工业体系, 从而直接实现工业转型的本来目标。但是, 现阶段能源以及旧工业生产体系的短板急需先实现工业转型, 否则智能时代将难以真正实现。同时, 存在大量的技术以及硬件难点使得智能工业市场化速度缓慢, 在不考虑成本的情况下, 可能先实现“实验室智能工业”, 再长期缓慢向现实工业应用场景中逐步实现。

〔关键词〕 人工智能 具身人工智能 工业转型 智能工业 技术图景 技术路径 AI 演化 工业应用

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2025.06.009

〔中图分类号〕F062.4; F49 〔文献标识码〕A

引 言

随着 2022 年 OpenAI 的 ChatGPT 以革命性的方式宣布大语言模型 (LLM) 的正式商业化稳定运用成为现实以来, 人工智能才系统性地影响和广泛作用于广大受众, 并成为通用技术 (General Purpose Technology) 的一部分。事实上 1956 年达特茅斯会议就标志着 AI 的诞生, 在此后漫长的岁月中, AI 发展经历了启蒙-低潮-复兴-遇冷-快速发展 5 个阶段。从霍普菲尔德神经网络 (Hopfield 网络) 到循环神经网络以及注意力机制主导的 Transformer 构架的提出, 从 OpenAI 于 2018 年起逐步推出的 GPT 系列模型 (GPT-1、GPT-2、GPT-3) 再到多模态架构下 GPT-4 的成功, 事实上是技术日渐积累爆发的结果^①。这一过程中对 Scaling Laws 的理解不断深化, 并伴随 BERT、T5 等并行范式的技术竞合, 最终推动了 AI 从“单任务感知”向“通用语言推理”跨越。AI 的井喷式发展事实上同样也是建立在各个行业“前工业智能化”改造的基础之

上^②, 尤其是工业领域已经有大量试图建立“工业物联网”的尝试。当前, 传统工业体系正在经历由“感知驱动”向“决策驱动”、由“自动化”向“智能化”的系统性跃迁。其中, AI 正重构工业的全流程结构, 从“数据+算法+传感器”的感知层级, 扩展为“数据+算法+传感器+行为 Tokenization+智能控制系统”的具身智能工业体系。

AI 的深度赋能不仅仅在于优化现有流程, 更在于催生一种全新的工业范式。这一范式将传统“工业-物联网-数据智能”路径演化为“工业-物联网+行为数字化+自监督控制系统”的新链条, 构成一种“具身智能工业形态” (Embodied Intelligent Industry)。在该体系中, 工业设备不再只是数据终端, 而是行为主体, 其行为以 Token 形式被嵌入至 AI 模型中, 实现类脑智能的具身表达, 这一变革模式可类比为工业领域的“AlphaGo+OpenAI”融合模式, 从而使得工业转型是具身智能工业发展的必然路径和必然归宿。

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“企业社会责任在供应链上的溢出效应研究”(项目编号: 72202116)。

作者简介: 朱云轩, 清华大学五道口金融学院博士后。研究方向: 人工智能及人工智能产品级开发、数字技术、计算策略、金融科技及公共财政。黎菁, 通讯作者, 清华大学五道口金融学院绿色金融研究中心高级研究员, 博士。研究方向: 绿色金融、数字经济、公司金融、供应链管理。彭拓宇, 上海产研技术研究院有限公司副总经理, 博士。研究方向: 人工智能、具身 AI、人工智能的产业化应用、公司金融。

更进一步看,工业体系的智能化重构,不只是AI发展的受益者,也是推动者。AI通过促进能源调度优化、精密制造控制、智能后处理与产品生命周期管理等环节升级,显著提升工业系统的韧性与效率;另外,工业场景自身的复杂性、反馈性和实时性,也对AI提出了更高要求,进而反向推动AI在算力架构、时空建模、Agent协作等方面的突破。这种“共生式演进”构成新一轮工业革命的技术基础。AI深度加速工业转型,本质上就是AI加速构造新的智能工业体系,实现新一轮工业革命,同时工业转型速度的提高也促使智能工业体系提前到来,二者一体两面,相辅相成,均是实现新一轮工业革命的题中之义。然而,传统工业基础设施与能源体系的诸多约束,仍制约了具身智能工业的规模化落地。如现有工业体系在数据结构、网络协议、能源模式与控制逻辑方面仍以“确定性-静态性-刚性逻辑”为主,这与AI所要求的“不确定性建模-动态反馈-自适应控制”存在显著鸿沟。因此,亟需加速推进以AI为核心的新型工业体系建设,实现在感知、边缘处理、行为建模、智能决策、系统协同与安全可信等环节的全面升级。

从传统工业体系转变为智能工业体系有其自身的轨迹和路径。从技术路径上看,基本存在以下几个核心环节:(1)感知层的数据采集。这一部分主要是多模态传感器网络、工业物联网(IIOT)以及数字孪生数据采集。通过“传感器+高精度低延迟+多种工业协议(如PROFINET/OPC UA/Modbus等)”实现多通道高量的数据采集;(2)边缘计算。这一部分是人工智能与智能算法、深度学习等领域高度交融的环节,主要包括异构计算架构、轻量化AI推理以及实时操作系统(需要满足微秒级任务调度);(3)行为数字化(行为Tokenization)。这也是具身人工智能重要的突破方向,现阶段主要包括工业过程Tokenization(设备行为编码以及操作行为建模)以及知识图谱构建(如Neo4j工业知识图谱);(4)智能决策与类脑系统。包括混合AI系统以及数字孪生仿真、神经符号系统(Neuro-Symbolic System, NeSy)以及构建闭环的智能反馈控制体系等;(5)云边协同架构。包括Edge、Fog、Cloud以及数据通道等建设;(6)可信安全体系构建。如区块链存证、加密传输、异常检测等。需

要特别注意的是,不同行业(如离散制造对比流程工业)需要定制化技术组合,因此应通过POC(Proof of Concept)验证再进行规模推广。当前最前沿的探索方向包括工业元宇宙(Industrial Metaverse)中的神经符号系统(NeSy)和量子优化算法(如QAOA、VQE)的工业应用^③。

从现阶段的技术积累来看,几乎在所有的方向上都有较为充分的技术积累,因此这也是本文预言智能工业已经处于Grokking前夜的重要原因。然而,现阶段在技术和硬件上的诸多困难可能使得可以市场化的智能工业应用场景不足,尤其是碎片化低质工业数据、3D环境建模、算法与系统集成的难点(如实时性约束、可靠性困境、具身AI本身的功耗、误差积累等)、具身AI的运动控制与大脑决策的模块化并行开发困难、机械精密加工(纳米级谐波减速器)、多模态融合算法(跨模态注意力机制)和领域知识嵌入(工业机理模型)、超高性能芯片等世界性难题。因此,在不考虑成本的情况下,智能工业可能最先在实验室环境下得以实现,但是要真正进入工业应用场景,还需要漫长的技术优化以及硬件革新^④。

1 背景现状

1.1 云端智能的演化与行业融合态势

随着深度学习(Deep Learning)与强化学习(Reinforcement Learning)等核心算法体系的持续演进,人工智能在“大模型+大数据+大算力”三位一体支撑下,呈现出高度可扩展性与跨行业融合趋势。近年来,基于云计算架构的AI系统不仅在推理效率、资源调度与部署灵活性方面不断优化,而且正在逐步成为多行业数智化转型的关键赋能引擎。

在底层基础设施方面,云端AI得益于GPU/TPU算力集群、高速分布式存储系统(如Ceph、HDFS)、容器化调度系统(如Kubernetes)与弹性伸缩架构的成熟应用,实现了高可用性、高并发、低延迟的AI服务部署模式。特别是在模型训练与推理阶段,采用分布式数据并行(DDP)、模型并行(Megatron-LM、ZeRO)、混合精度训练(AMP)等优化技术,使云端AI服务具备了工业级水平的处理能力。

这种云端AI基础架构与上层应用的结合,催生出一批产业AI解决方案,如多模态诊疗辅助系统、智能教育反馈系统、自动化能效监控系统等,推动了AI技术从“平台级工具”向“嵌入式生态”

演进。如在教育领域,教育部办公厅2024年发布了《关于加强中小学人工智能教育的通知》^⑤,而在2023年中国教育智能硬件市场规模就达到约512亿元。在头部厂商的AI技术布局应用下,AI技术的贡献率约为11%,其中以AI推理服务(Inference as a Service)增长最为迅猛,成为推动下游行业AI普及的关键引擎。生物医疗领域,希格生科(深圳)全球首个基于其“类器官+AI”药物研发平台开发的核心产品SIGX1094,获得美国食品药品监督管理局(FDA)快速通道认定^⑥。但据相关研究测算,“云端”目前仅能完成人类世界总任务量的0.5%~1%左右,与未来“AIGC时代”仍存在一定距离。

1.2 工业物联网为AI“具身智能”奠定技术底座

工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)作为“感知-通信-决策”一体化系统架构,是当前AI从“虚拟智能”迈向“具身智能”的关键通路。其核心在于将分布式传感网络、边缘计算节点与云端AI平台高效耦合,实现工业系统运行状态的实时感知、精准建模与智能决策闭环。在这一背景下,工业领域正逐渐成为AI技术“从云端到物理世界”转化的试验田。

本质上,物联网构成了一种“数据+传感器+智能算法”的系统性协同网络,其核心功能包括多源异构数据采集、通信协议标准化、数据驱动建模等。在此架构基础上,AI通过强化学习、图神经网络、多模态融合等算法模型,对工业流程中产生的高维、非结构化数据进行建模,从而突破传统规则引擎与参数设定所带来的系统瓶颈,实现由“感知-预测-优化-控制”全链条的闭环反馈控制系统。

关键的突破点在于“行为数字化”(Behavior Tokenization)的引入,它使得原本只能在数字空间中处理的任务,得以向物理世界中延伸。行为Token化机制将工业过程中的关键操作(如机械臂运动、温控系统调节、复杂设备联动等)转化为标准化的语义单元,从而使AI模型不仅能够“理解”工业行为,更能“生成”或“控制”具体行为,推动AI从分析型引擎走向具身控制智能体(Embodied Agents)。如在智能制造场景中,Tokenized工业行为库可被Transformer类模型调用,实现自主工艺参数推荐、异常操作预警甚至多设备协同

控制。配合数字孪生(Digital Twin)系统,AI可以对真实物理环境进行高保真虚拟建模与仿真迭代,为最终部署提供安全性与效率保障。

因此,工业物联网不仅实现了工业流程的数据化与模型化,更重要的是,它为AI系统提供了直接与物理世界交互的“神经通道”,从而使得“具身智能”成为技术上可行、系统上闭环、产业上落地的现实路径。与消费级AI不同,工业AI的嵌入强调强耦合性、低延迟性与任务闭环性,这也决定了工业场景极具代表性地成为AI具身化发展的“第一落点”。

随着AI模型的迁移能力(Transferability)、泛化能力(Generalization)与微调能力(Fine-tuning)持续增强,叠加物联网、5G、TSN(Time-Sensitive Networking)等通信基础设施的升级,工业AI已具备跨越从云端推理到物理执行的关键技术能力。这一趋势预示着具身智能时代的技术门槛正在被逐步突破,工业系统将从“智能辅助”迈向“智能代理”,由此构建起新一代可演化、可自治、可精准的智能工业体系。

1.3 具身人工智能^⑦处于Grokking临界前夜,迈向工业智能的跃迁节点

“具身人工智能”(Embodied AI)作为当前AI发展的重要分支,标志着人工智能正从以“数据驱动”的静态推理系统向“行为驱动”的动态感知控制系统转型。

工业领域因其天然具备高密度感知节点、结构化作业流程与边缘算力支撑,已成为具身AI最有可能率先实现闭环落地的应用场景。这一进展被越来越多研究视为人工智能进入“Grokking前夜”^⑧的技术征兆。2024年中国工业机器人渗透率达4%,预计至2025年AI应用比重将从3%升至25%^⑨。当前“感知-决策-执行”闭环已初步形成^⑩,未来非标焊接、柔性装配等复杂任务有望通过具身AI实现自主适应,推动工业从“机械执行”向“自主适应”以及“通用智能”升级,智能工业的时代将加速到来^⑪。随着Grokking前夜的到来,人工智能将迈出从云端走向物理世界的关键性一步。

此外,在建模策略方面,Transformer结构下的行为编码器、Actor-Critic架构下的分布式决策模块、以及集成符号知识图谱的混合推理系统,逐

步拓展了具身 AI 系统的解释性与泛化能力,使其不仅可执行预定义流程,更能在不确定性场景下实现即兴规划与动作调度。具身 AI 的跃迁不仅是 AI 本体的能力拓展,更是工业智能生态的结构性重构。它将推动工业系统从“精密机械化”走向“类脑智能化”,从“规则控制”走向“自我演化”。当前处于 Grokking 前夜的具身 AI,正站在技术奇点的门槛,随着自监督学习、多模态交互、以及硬件神经形态计算等前沿技术的成熟,下一代具身智能工业体系将逐步走出实验室,进入实际工业生产与管理应用级场景(虽然这必然是一个长期的漫长过程)。

2 人工智能与工业转型的双向重构

当前的工业转型不仅是传统生产方式的局部优化,更是一次由“结构性数据-语义建模-行为执行”三重维度重构的系统性范式变革。在这一变革过程中,人工智能技术与工业生产深度融合,以“数据-算法-算力”三位一体的系统性驱动机制为核心,实现对传统工业链条从端到端的智能重塑。

具体而言,大规模工业数据通过传感器网络与边缘节点实现多源异构采集,智能算法通过深度学习、强化学习及神经符号系统对工业逻辑建模与复杂行为向量化,底层算力基础则由分布式 GPU 集群、边缘推理芯片(如 NPU、RISC-V)、低功耗 AI SoC 等技术支撑。这一系统性集成最终导向的是“以智能体为核心控制单元”的具身智能工业体系,具备自感知、自决策、自控制能力。

然而,当前 AI 所依赖的巨量模型参数训练(如千亿级语言模型)与大规模 GPU 并行计算架构,也带来了能源资源的高强度消耗。这一现象构成了所谓的“智能转型悖论”:AI 所推动的工业升级倚赖的算力基础,反而可能加剧传统高能耗结构的资源压力,若无法在能源结构与算力架构中实现绿色转型,则具身智能工业的发展反而可能内嵌进对现有碳密集型工业路径的依赖之中。因此,绿色算力架构(如异构融合计算、可再生能源驱动数据中心)与低碳工业流程重构应被视作实现“AI-工业”双向重构的前置条件。

2.1 从全链条视角理解工业智能化的演进路径

工业转型是覆盖全流程的系统性变革,广义上涵盖能源获取、生产组织、管理决策、终端处

置四大关键环节。每一环节在智能化过程中均呈现出独特的 AI 技术嵌入路径与系统效能跃升方式,构成新一代智能工业体系的核心支撑。

(1) 在能源侧,其核心是智能调度与可再生能源协同优化。AI 在能源侧的主要任务是实现高维异构数据条件下的动态优化调度。具体而言,通过时间序列建模(如 Transformer Time Series 变体)、风速光照预测模型、边缘融合预测网络等方法,提升风电、光伏等可再生能源的发电能力预测精度与储能管理效率。相关 AI 控制系统(如基于 RL 的微电网能量调度器)已被部署于智能微电网与虚拟电厂(VPP)场景,实现能源调配的“最优-实时-低耗”控制。

(2) 在管理侧,核心是实现透明化、可视化与自主决策融合。在工业经营管理层,IoT 与 AI 结合已广泛应用于生产过程的状态感知、流程建模与指标预测。传感器层面通过分布式部署的 MEMS 器件、工业图像采集设备以及边缘 AI 模组实现高分辨率数据采集;分析层面,强化学习(RL)与演化策略算法在设备调控、故障预判、作业协同等领域逐步替代传统规则控制器,尤其在军工领域(如飞行控制、目标追踪、战场推理)形成先发优势,并将能力迁移至民用智能工厂。

(3) 在生产与销售侧,核心是从预测性调度到数据驱动反向设计。生产环节中,AI 通过构建自适应流程模型(Adaptive Flow Models),实现对设备状态、材料配比、流程切换的动态调控。如工业图像识别结合残差网络(ResNet)、UNet 等模型已广泛应用于焊接缺陷检测、产品色差识别、表面瑕疵识别等;同时,销售端的大数据分析也反向作用于生产决策,如通过客户购买行为与功能偏好预测优化产品设计参数、功能模块组合等,从而构建端到端的“市场-研发-生产”闭环。

(4) 在终端处理侧,核心是智能回收、碳追踪与可持续循环。终端处置环节作为工业闭环生态的重要一环,正逐渐形成 AI+IoT+边缘计算联合主导的新范式。在该环节,典型技术路径包括计算机视觉驱动的废品识别与分拣(CV-based Classification)、AI 辅助的残值评估系统(Residual Value Estimation)、嵌入式芯片支持的碳足迹追踪系统(Edge Carbon Traceability)、以及基于知识图谱的逆向物流调度优化(Reverse Logistics with KGs)。如

智能机械臂通过多模态数据融合模型(视觉+触觉+动作轨迹)实现对废弃品精准识别与抓取,其在电子垃圾回收、工业零件再制造等场景中已具备规模化部署潜力。碳资产智能化追踪与排放行为建模则为 ESG 合规与绿色金融提供了技术支撑。以上技术环节综合在一起,共同构成人工智能深度加速的智能工业体系^⑫。

2.2 “数据+算法+算力”三元协同:智能工业体系的技术底座

新一代工业智能体系的核心,在于以数据、算法与算力为基础构建的高耦合、高响应、高泛化的技术底座。这一三元架构不仅为 AI 在工业场景中的可行性提供技术路径,也构成了 Embodied AI 具身化落地的逻辑前提。通过“感知-建模-控制”全链条的信息闭环,该体系推动传统工业从静态线性生产范式向动态自适应智能体范式转型。

数据是新工业体系的“第一生产要素”。在传统工业体系中,数据往往以“记录”形式存在,缺乏实时性与结构化处理能力。而在智能工业体系中,数据具备原生可计算性,被视为驱动生产优化、行为建模与决策执行的第一要素。工业物联网(IIoT)、分布式传感器网络、数字孪生系统与区块链物流协议等技术,使得工业企业能够实现从底层设备到顶层决策的数据链全覆盖,为智能算法提供高频、高维、高准确性的训练基础^⑬。

算法是智能决策与生产优化的技术中枢。算法体系作为工业智能化的认知引擎,承担着从过程建模、故障预测到行为规划的一系列任务,是实现具身工业系统闭环控制能力的核心支撑。目前在工业场景中应用最广泛的算法体系包括:深度学习、强化学习与多智能体系统(RL & Multi-Agent Systems)、基于知识图谱的语义推理系统(KG-Based Reasoning)、边缘智能算法与 TinyML 模型等。算法体系推动工业企业从“事后处理”向“事前预测+过程干预”转变^⑭。

算力是智能工业的基础设施层支撑。随着 AI 模型复杂度指数级增长,算力已成为限制工业智能化能力边界的核心瓶颈。工业 AI 不仅需要面向海量历史数据进行离线训练,还需在运行期完成毫秒级决策推理。当前工业领域主要采用“边缘-云-集中式数据中心”协同架构,通过边缘算力(Edge AI)、云端算力(Cloud AI)、高性能算力平台(如

HPC/AI 超级计算中心)等来构建国家底层算力底座。主流工业国家正在加速建设绿色高效数据中心与工业边缘智能网络,以满足“高并发+高效能+低碳排”的智能工业演进需求。

上述三元协同体系不仅构建起智能工业的基本底座,更为具身人工智能(Embodied AI)的产业级落地奠定了路径。具身 AI 通常被定义为:“数据+感知算法+行为 Tokenization+控制系统”五层联动系统,强调 AI 智能体对物理世界的“感知-理解-反馈”能力。工业正是 Embodied AI 最具落地潜力的主战场,构建了从传感器到控制器,从虚拟模型到现实行为的完整执行链条。

需要指出的一点在于,目前主流具身 AI 产品依然停留在“类具身+结构强化学习”的早期形态,并未形成端到端通用智能体系统(End-to-End Agent)。如 Figure 公司推出的 Helix 机器人,其本质上是在 PaLM-E、RT-2 等语言与视觉模型基础上嵌入中间任务解耦层(Buffer Layer)所构建的类 Agent 系统。在严格限定任务范围与环境结构的条件下,其性能表现良好,但在面对开放任务集、高动态环境与任务组合复杂度指数级增长的工业应用中,仍面临严重的泛化能力瓶颈。当前所谓的“具身智能工业系统”,在语义理解、行为生成、因果反馈与策略泛化等方面仍存在显著短板。因此,尽管“数据-算法-算力”三要素架构提供了坚实的工程基础,但要实现真正可泛化、自主决策、跨场景迁移的工业智能体,还需跨越诸多理论与工程障碍。

可以预见,随着工业智能基础架构的不断成熟,AI 能力将由连接式智能(Connected Intelligence)升级为交互式智能(Interactive Intelligence)。这意味着未来的 AI 系统不仅是“信息中转站”,更是主动行为的发起者与合作主体。由此构建的新一代产业体系将呈现出以下三大趋势:(1)跨领域智能联动。AI 能力将由工业领域扩散至农业、服务业、城市管理等多维场景,形成泛产业智能生态;(2)场景内精度协同。系统将不再依赖静态规则表,而是在不断交互中持续优化对语境、物理环境与行为反馈的理解;(3)协作性自主体涌现。工业机器人将不仅是“任务执行器”,更是“局部智能协作者”,参与资源协商、任务分配与流程协同。

在迈向高阶具身智能工业体系的道路上,工

程落地仍需保持技术冷静与系统耐心。唯有在持续突破感知精度、决策响应、低碳算力、软硬协同等关键技术的同时,才能真正打开从“感知物理”到“理解物理”再到“重构物理”的路径通道。

3 智能工业的建设是工业转型的内在逻辑

3.1 从“再优化”到“范式重构”:智能工业革命的技术逻辑与能耗悖论

工业转型并非传统工业流程的线性升级或优化叠加,而是一场从技术逻辑、资源结构、能源范式到系统架构的全面重塑。传统工业侧重于提升生产效率与压缩边际成本,其早期的“转型”概念主要针对重污染、高排放、高能耗等不可持续性问题,强调末端治理与资源再配置策略。然而,随着人工智能迈入“AlphaGo+OpenAI”主导的生成智能时代,工业转型正被赋予深层系统性含义——它不再局限于效率改良,而是构成一场由AI驱动、以全栈数字化为基础、以新型能源体系为支撑的新工业革命原点性跃迁。

这一转型革命的核心结构,在于由“数据+算法+算力”三元体系构成的AI技术范式与传统工业逻辑的深度融合。以Transformer类模型为代表的通用人工智能架构、以行为Tokenization与控制神经模块为基础的具身智能系统、以及以自适应调度与多智能体协作为核心的工业认知Agent,正在赋予工业体系以端到端的“感知-决策-执行”闭环能力。这些技术不仅重构了“生产-设计-调度-管理”的全生命周期流程,也正通过高度自动化与泛化能力催生一整套新型智能控制范式。

与此同时,智能工业体系对算力与能源的需求呈现出超指数增长特征,逐步显现出以AI技术为内生驱动力的“能耗-重塑-反馈”机制。这种机制的逻辑在于:AI以其卓越的分析与优化能力加速工业流程智能化,提升资源配置效率;另外,AI本身的训练过程与运行周期所依赖的高性能计算资源(HPC/GPU集群)正在成为全球能源消耗的新高地^⑤。

在能源边界逐渐成为AI扩张瓶颈的现实约束下,AI不再是单一的赋能工具,而反过来成为推动能源系统与工业架构同步转型的倒逼性力量。若无法通过可再生能源、清洁高密度能源(如小型模块化核反应堆SMR)以及绿色算力架构实现体系性升级,AI驱动下的智能工业革命将陷入结构性

资源困局^⑥。

3.2 工业转型的前置性:能源系统的根本重塑

在这一背景下,全球资源约束与生态环境压力,尤其是电力供应的系统性不足,使得工业转型不再是战略选择,而是技术演化的前提条件。全球主要经济体已将能源系统的结构性重构视为新工业革命的入口。如欧盟于2024年发布的《地平线欧洲战略计划2025~2027》,美国为可持续能源技术提供3690亿美元补贴的《通胀削减法案》(2022),以及中国2025年政府工作报告提出“加快发展绿色低碳经济”^⑦,均体现这一趋势。这些国家战略的根本逻辑并非仅关注生态目标,而是基于对AI时代能源底座重构的前瞻性判断。事实上,人工智能与能源系统正在从“工具与支撑”的关系,演化为“系统共生与技术耦合”的新范式。

由此可见,人工智能与工业转型已形成一种正反馈式共演系统:AI推动工业流程从物理机制到控制逻辑的数字重构;而智能工业对能源结构与基础设施能力的高要求,反过来倒逼传统工业系统率先在能源、材料、生产结构上进行技术革新。这种“双向重构机制”最终将使工业革命不再以单点技术突破为主线,而是以全栈技术耦合、系统协同演化为内核的复杂系统跃迁。

未来的产业演化,将不再是“AI进入工业”的单向嵌入逻辑,而是“AI与能源系统共建-工业系统重构-生态系统演化”的联动性技术链条。这场从“万物互联”走向“万物互动”的深层转型,标志着人类社会即将跨入真正意义上的具身智能工业时代。

4 未来展望及政策建议

当前,全球工业体系正处于由传统工业向智能工业转型的关键时期,人工智能在推进智能工业从实验室到现实场景落地过程中还面临多重挑战。对此,本文建议聚焦以下路径,期望加快人工智能在工业转型领域的系统性布局,助力新一轮工业革命。

(1) 构建“绿色算力-智能制造”双融合基础设施体系,推动新型工业底座重塑。当前AI驱动下的智能工业体系已展现出高算力密集与能源耦合特性,工业系统中“算力”已成为类同“水、电、煤”的基础性资源。与此同时,传统工业能源结构难以支撑大规模AI部署形成的功耗负荷。

而核心问题在于,我国目前AI基础设施以“云中心”为主导,绿色算力占比不足,工业边缘智能节点部署标准缺失,难以满足智能制造实际生产响应需求。因此建议制定国家级智能制造与绿色算力融合设施专项规划,在长三角、成渝、环渤海等智能制造密集区布局绿色AI算力调度节点;推动“智能制造-清洁能源-边缘AI”一体化示范园区建设,支持企业部署具备碳足迹追踪能力的工业AI节点;优先支持国产AI芯片在工业场景中的低功耗部署,实现“边缘小脑+云端大脑”的协同控制体系;鼓励企业引入碳中和机制中的AI能效约束条款,通过智能工厂运行能效与AI功耗形成闭环指标。

(2) 设立“具身智能工业”国家重大科技专项,加快突破多模态感知与控制集成关键技术。我国当前大模型技术快速追赶甚至在某些方向上已经超越了美国先进AI公司(如Deepseek在硬件优化以及一系列优化技术上的原创性贡献),但具身智能系统仍严重依赖国外框架(如RT-2、PaLM-E、Figure Helix等,事实上即使在云端,基于Transformer的技术框架以及CUDA的架构已经构成坚固的“护城河”),缺乏在工业机器人、视觉控制、Token行为建模等方面的自主原创路径。现核心问题在于,工业领域中行为Tokenization、类人协同控制、多模态实时决策系统等技术链条仍处于“非工程化、不可迁移”的前开发阶段,国内缺乏系统化支持。因此建议设计政策,重点攻关六大方向:①工业行为Token建模框架;②多模态感知与低时延处理系统;③“数字孪生+控制仿真”并行系统;④自主任务规划与路径学习算法;⑤工业知识图谱与符号AI融合系统;⑥工业级agent系统安全可靠标准。并进一步引导龙头企业建立具身AI工业联合实验室,通过POC验证与跨行业迁移测试推动产业落地。同时,鼓励企业围绕特定垂直场景(焊接、装配、检测、物流)进行“端到端Agent系统”的部署与评估。

(3) 建立“智能工业生态适配评估体系”,引导工业分阶段转型与行业级分层推进。智能工业体系建设高度依赖行业异构结构,不同行业(如流程工业与离散制造)在数据结构、控制需求与实时性约束等方面存在显著差异。现阶段存在的核心问题在于当前政策普遍强调全面数字化转型,

但缺乏具身智能时代下更具行业适配性的评估、激励与演化机制,易导致“盲目上马”、“重复部署”等效率损失。因此建议制定智能工业体系适配性评估体系,包括数据质量与结构指数(Data Readiness)、实时控制响应评估(RT-RTS Benchmark)、具身部署适配性(Embodied Readiness)、能源功耗与碳指标兼容性(Green Industrial Index)等行业维度指标。推动不同工业门类制定分层转型策略,如流程工业优先部署预测维护与控制优化,离散制造优先布局协作型具身机器人;引导地方政府设立智能工业“试点清单制度”,按照“感知-推理-控制”三阶段给予差异化财政与算力资源支持;鼓励绿色债券、ESG基金、地方AI引导基金等嵌入具身AI系统的产业投资评估标准。

面对人工智能深度嵌入工业系统、重塑产业范式的新趋势,我们亟需从基础设施建设、关键技术突破、行业适配机制三个维度发力,推动智能工业革命健康有序演进。以上政策建议是为具身智能工业提供资源底座与能源保障,打通关键技术链条,构建自主可控的工业级AI系统以及强化行业研发节奏管控,推动智能工业由点到面科学演化而提出的。三者协同发力,既能提高中国在全球新一轮工业革命中抢占先机的概率,也可在很大程度上避免能耗失控、技术碎片化等系统性风险。通过有前瞻、有节奏、有韧性的政策体系,中国有望构建面向未来的低碳、高效、自主、安全的具身智能工业新格局。

注释:

- ①如2018年6月提出的GPT-1,2019年2月提出的GPT-2以及2020年5月提出的GPT-3以及在GPT-3.5以及GPT-4构架上产生的ChatGPT,其中伴随着对于Scaling Law的不同理解(主要是对于OpenAI Scaling Law以及Chinchilla Scaling Law的理解,从某种意义上讲,Scaling Law决定了大模型的命运以及市场化前景)以及Bert模型的技术挑战。
- ②如2018年提出大力发展数字经济的国家级战略安排。
- ③前者主要致力于在多模态语义空间中实现工业认知闭环;后者主要是在高维控制参数空间的求解应用,用于工业级资源配置与路径规划等问题。
- ④关于最终的“智能工业”图景和现阶段智能工业处于Grokking前夜的判断,笔者认为并不冲突。最终的智能工业应用图景类似于AGI,借鉴周鸿祎的话来说,真正意义上的AGI可能需要10年、20年,甚至于永远不可能真正实现,但是,如果在某个垂直领域开发出了独立意义上的适用该领域各种应用场景的Agent,那么为什么不能认为事实上就是实现了这一垂直领域的AGI呢?现阶段、无人驾驶汽车、低空经济、智能配送等垂直

领域的智能工业应用,如果可以完美完成狭小领域内的所有任务,那么我们可以认为这一垂直领域的智能工业事实上就已经实现了。同理,如果可以开发一款家用扫地机器人,可以完成任何家庭环境下的扫地、清洁、归位任务,那么家庭扫地这一垂直领域的智能工业事实上也可以被看作是实现了,而不必真正开发出胜任95%以上各种泛任务的具身机器人。

⑤数据来源:中国网。

⑥资料来源:公司官网。

⑦Embodied AI即AI不仅停留在虚拟的云端,不再局限于单纯的数据分析和预测模型,而是能够深入到真实物理世界,感知环境、与外界互动,并自行或协同控制物理设备,实现对客观世界的直接干预和主动响应(即作为一个真正的智能体Agent在行动)。Embodied AI系统具备对环境的主动感知能力(Perception)、上下文理解与决策规划能力(Reasoning and Planning),以及最终面向物理世界的执行控制能力(Physical Actuation),实现了从信息智能(Informational Intelligence)向物理智能(Physical Intelligence)的系统性延展。具身AI的核心标志在于其作为“智能体”(Agent)的行为属性,即能在复杂动态环境中基于感知信息自适应作出决策,并直接干预或协同控制物理设备完成任务。

⑧具体而言,在训练深度学习模型的初始阶段,大量数据投入与算力增加可能难以获得预期效果;但随着关键数据规模、算力水平和训练阶段性累积跨过某个临界点,人工智能模型可能突然获得质的飞跃,准确度、泛化能力和对现实环境的应对能力显著提升,不再仅仅是渐进的线性提高,而是呈现陡然的跃迁。一般而言,该非线性的能力“跃迁”现象需要3个方面的同步突破:规模化结构数据的积累、算力资源持续增长(尤其是在低延迟高吞吐边缘算力节点的部署)、模型结构对领域知识的渐进式吸收(如引入符号表示、因果图谱、模块化结构等机制)。

⑨据MIR DATABANK数据统计,2024年中国工业机器人市场渗透率虽然仅为4%,但从2018~2025年,中国工业行业细分行业中,人工智能应用的总体比重将从3%上升至25%,云端AI的快速发展已经给Embodied AI打下坚实基础。(数据来源:Bitwit,德勤研究,2025年数据为趋势测算数据。)

⑩目前已有多个工业级具身智能系统实现从试验验证到场景部署的跃迁,如Tesla Optimus初步具备复杂任务执行与自适应导航的可能性;Figure AI的人形机器人标志着具身AI由“Demo阶段”迈入“工业PoC验证阶段”;此外,国内企业如智元机器人、优必选、宇树科技等,正在以视觉-触觉融合、轻量级控制架构、人机协作设计等路径推进工业级具身智能体的工程实现。

⑪笔者深知工业领域完成具身AI的普世化图景极为艰难,工业领域的不同技术应用以及框架执行差异极大,同时有其自身的历史沿革,不可强求。但AI时代的到来必然会解决极多如数据采集、端口分析、故障诊断、精密计算及控制、实时决策等共性问题,随着高性能芯片的进一步研发,Embodied AI的趋势是必然的。这一点发展可能类似于90年代无人车概念车就已经提出,但是直到最近才在中国部分城市进行商业化运营一样。

⑫以上环节在工业领域已经实现了广泛突破,且已经形成了许多具有代表性的应用场景。如计算机视觉技术(CV)对于产品裂

纹、色差的监控,电路板焊接缺陷、汽车油漆喷涂的均匀性,自动化机械臂对材料进行回收、对废旧产品的残值进行评估并进行状态分析等,物流和自动化运输方面也处于AI具身能力涌现的前夜,尤其是最近“低空经济”的发展得到了政府的大力支持,无人配送、低空机器人装配预期会孵化一个巨大的市场。物联网典型的垂直应用领域之一就是“智慧家居”,智能远程家居控制以及家居自动化是具身人工智能在努力突破的方向(主要是复杂任务的处理),其余在NLP用户挖掘、故障诊断、AR/VR等方面也取得了长足进步,虽然总体上我们距离智能工业还有相当长的距离,但总体的转型趋势清晰可见。

⑬以电力企业为例,部署具备高分辨率监测能力的智能传感器后,系统可实时采集负载波动、电压频率、环境温度与能量质量等多维指标,并结合智能边缘设备进行局部预判与异常检测,显著提升运行安全性与能源利用率。这种“数据-感知-反应”机制正逐步从能源行业扩展至流程工业、制造业、仓储物流等核心领域。

⑭如在高精度设备管理场景中,通过自监督学习方法构建设备行为模型,可实现分钟级故障预判与维护策略制定,有效减少非计划性停机与资源浪费。

⑮像100T及以上的模型,可能需要数百万颗H100级别的GPU,以及超大规模的数据存储和处理能力。尤其是随着对多智能体概念的不断尝试以及多模态AI的深度研发,高性能的GPU集群会消耗巨量的电力,Elon Musk认为到2025年人类的电力供应就将不足以为所有的人工智能芯片供电。事实上,GPT-4.5训练一次的用电量约等于苏州市一天的用电量。因此黄仁勋开玩笑说:“AI的尽头是电力”。当下,多模态模型与多智能体系统(MAS)的广泛研发,已使100T参数级模型的部署成为常态,其背后所需的H100等级GPU数量动辄上百万颗,数据中心的散热、维持和电网调度压力同步指数级上升。

⑯这也解释了,为何为了解决电力以及能源严重不足的问题,OpenAI首席执行官Sam Altman以及Google均在和Kairos Power以及Oklo公司就采用小型核反应堆专门供电的方案进行磋商。

⑰数据来源:经济参考报,科技日报,新京报。

参 考 文 献

- [1] 安同良,魏捷. 中国经济学走向何处:复杂经济学视域下新经济发展对中国经济学的重构[J]. 中国工业经济, 2023, (12): 5~23.
- [2] 白辰甲,许华哲,李学龙. 大模型驱动的具身智能:发展与挑战[J]. 中国科学:信息科学, 2024, 54(9): 2035~2082.
- [3] 楚欣. AI大模型加持下具身智能开启智能制造升级新篇章[J]. 中国工业和信息化, 2025, (Z1): 20~26.
- [4] 董之南,张勤学,胡进,等. 面向大模型多智能体系统的多维评估方法[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47(2): 121~131.
- [5] 方斌,唐新杰,王仕贤,等. 末端智能:具身智能操作末端的发展与挑战[J]. 人工智能, 2024, (6): 50~62.
- [6] 黄菊锋. 具身智能:开启AI与物理世界交互新纪元[J]. 中国工业和信息化, 2025, (Z1): 14~19.
- [7] 黄晓野,代栓平,李克. 技术革命周期与我国算力竞争战略选择——基于DeepSeek复杂经济系统的思考[J]. 工业技术经济, 2025, 44(4): 25~31.

- [8] 纪玉山. 大模型落地的经济学逻辑与路径选择 [J]. 工业技术经济, 2025, 44 (4): 5~13.
- [9] 刘海军, 温赞玲. 深度求索 DeepSeek: 人工智能、技术创新与新质生产力 [J/OL]. 当代经济管理: 1~13.
- [10] 庞会荣. 技术融合推动具身智能走进现实 [J]. 中国工业和信息化, 2025, (Z1): 34~39.
- [11] 苏美文, 杨文爽, 李博文, 等. 推动人工智能与实体经济深度融合加快发展新质生产力 [J]. 工业技术经济, 2025, 44 (4): 32~59.
- [12] 王冲, 贾琪, 陈紫薇, 等. 电力系统关键领域“卡脖子”技术评价研究 [J]. 工业技术经济, 2024, 43 (11): 153~160.
- [13] 张伟男, 刘挺. 具身智能的研究与应用 [J]. 智能系统学报, 2025, 20 (1): 255~262.
- [14] 孙长银, 袁心, 王远大, 等. 具身智能自主无人系统技术 [J]. 自动化学报, 2025, 51 (4): 762~777.
- [15] 蒲天骄, 赵琦, 王新迎. 电力人工智能技术研究框架、应用现状及展望 [J]. 电网技术, 2025, 49 (5): 1751~1770.
- [16] 蒲泓宇, 贺云帆, 赵星. 人工智能大模型价值对齐评估研究综述 [J/OL]. 图书馆建设: 1~15.
- [17] 杨玉琪, 王梦云, 刘运卓, 等. 具身智能及其在自主无人系统的应用研究 [J]. 无人系统技术, 2024, 7 (5): 99~110.
- [18] 谭营. 我国人工智能技术优势与产业化发展态势 [J]. 国家治理, 2024, (13): 15~21.
- [19] 赵杨, 张佳怡. 基于具身智能的人智交互体验研究: 理论、应用与展望 [J]. 情报理论与实践, 2025, 48 (3): 52~62, 72.
- [20] 赵正平. 人工智能大语言模型和 AI 芯片的新进展 (续) [J]. 微纳电子技术, 2025, 62 (4): 7~39.
- [21] 邹起浩, 任保平. 新一代人工智能驱动新型工业化: 范式变革、实践方向及路径选择 [J]. 财经问题研究, 2025, (4): 15~25.
- [22] 朱梦蛟, 杜严勇. 人工智能推理技术进展: 以中美及其重点企业对比为例 [J]. 北京科技大学学报 (社会科学版), 2025, 41 (3): 51~66.
- [23] 张旭龙, 瞿晓阳, 谢骏飞, 等. 人工智能生成式内容技术概述 [J/OL]. 大数据: 1~37.
- [24] 张应语, 孙军, 董绍增. 生成式人工智能治理的范式跃迁与实践路径——从 DeepSeek 说起 [J/OL]. 烟台大学学报 (哲学社会科学版): 1~16.
- [25] 张伟男, 刘挺. 具身智能的研究与应用 [J]. 智能系统学报, 2025, 20 (1): 255~262.

The Deeply Coupled Technological Pathway of Artificial Intelligence and Industry: From Cloud-based Cognition to Embodied Reconfiguration

Zhu Yunxuan¹ Li Jing¹ Peng Tuoyu²

(1. PBC School of Finance, Tsinghua University, Beijing 100083, China;

2. Shanghai Industrial Research Institute of Technology Co., Ltd, Shanghai 200233, China)

[Abstract] Industrial transformation is a natural part of the new round of industrial revolution, and the arrival of the artificial intelligence era has transformed the industrial productivity innovation in the sense of “Internet of Things” into a new industrial revolution of “data+algorithm+sensor+behavior tokenization+control system”. Artificial intelligence has transformed industry from the meaning of the Internet of Things to the embodied AI meaning of “AlphaGo+OpenAI”, putting the era of intelligent industry on the eve of Grokking. On the one hand, AI deeply accelerates industrial transformation, and on the other hand, it directly reconstructs into an intelligent industrial system, thereby directly achieving the original goal of industrial transformation. However, at present, the shortcomings of energy and the old industrial production system urgently need to be addressed through industrial transformation, otherwise the era of intelligence will be difficult to truly achieve. At the same time, there are a large number of technical and hardware difficulties that slow down the marketization of intelligent industry. Without considering costs, it is possible to first achieve “laboratory intelligent industry” and then gradually realize it in real industrial application scenarios over the long term.

[Key words] artificial intelligence; embodied artificial intelligence; industrial transformation; intelligent industry; technical landscape; technological path; AI evolution; industrial applications

[Jel classification] E60; E66; Q55

(责任编辑: 杨 婧)