DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.05.004

机器人集群控制赋能智能制造范式转型

陈晓红[1,2]，明荷汶[1,2]，张宇航[1,2]，周新民[3*]，周志方[1]

（1. 中南大学商学院，长沙 410083；2. 湘江实验室，长沙 410083；3. 湖南工商大学人工智能与机器人学院，长沙 410205）

摘要：智能制造作为提升产业竞争力、推动经济高质量发展的战略举措，正在经历从数字化、网络化向智能化演进的范式转型；机器人集群控制是适用于复杂工程系统的关键使能技术，可为智能制造系统的组织方式和运行逻辑重构以及相应的范式转型提供全新的理论视角与技术路径。本文在阐述机器人集群控制技术融入制造生产系统的发展现状、现实动因、理论关联的基础上，从任务执行逻辑、协同决策结构、生产调度模式、资源配置路径等维度出发，剖析了机器人集群控制赋能智能制造范式转型的重构机制；提炼了分布式装配、无人协同工厂、动态生产网络等机器人集群控制赋能智能制造范式转型的典型应用模式，辨析了中联重科共享制造智能工厂的实践案例，呈现了机器人集群控制赋能智能制造任务层、系统层、网络层的发展模式变革。从技术（协同算法、实时性、可靠性）、产业（标准、生态、安全）、战略实施（技术供给、系统集成、组织执行）层面总结了机器人集群控制赋能智能制造范式转型面临的未来挑战，针对性地提出了关键技术攻关、产业生态优化、战略引导强化等方面的发展建议。相关内容有助于推动机器人集群控制与智能制造的融合，为智能制造范式转型提供了理论解释与应用支撑。

关键词：智能制造；机器人；集群控制；范式转型；协同控制；分布式计算

中图分类号：TP18　　**文献标识码：**A

Robot Cluster Control Empowers the Paradigm Transformation of Intelligent Manufacturing

Chen Xiaohong[1,2], Ming Hewen[1,2], Zhang Yuhang[1,2], Zhou Xinmin[3*], Zhou Zhifang[1]

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410083, China; 3. School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: As a strategic initiative to enhance industrial competitiveness and drive high-quality economic development, intelligent manufacturing is currently undergoing a paradigm transformation from digitalization and networking to full intelligence. Robot cluster control, as a key enabling technology for complex engineering systems, offers novel theoretical perspectives and technological pathways for reconfiguring the organizational form and operational logic of intelligent manufacturing systems and for facilitating the associated paradigm transformation. Building upon an elucidation of the current status, practical drivers, and theoretical foundations underlying the integration of robot cluster control into manufacturing production systems, this study analyses the reconfiguration mechanism by which robot cluster control empowers the paradigm transformation of intelligent manufacturing, along four dimensions: task execution logic, collaborative decision-making structure, production scheduling mode, and resource allocation path. It further

收稿日期：2026-05-05；**修回日期：**2026-07-30

通讯作者：*周新民，湖南工商大学人工智能与机器人学院教授，研究方向为大数据与人工智能、AI大模型；E-mail: zhouxinmin2699@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“促进新质生产力发展的未来重点产业战略布局及实施路径研究”(2025-XBZD-14)，“基于天开高教科创园的初创企业创新评价和发展策略研究”(25ZLGCSS00070)，“湖南大数据利用和数字经济发展战略研究”(2025WK1007)；湘江实验室项目(24XJJCYJ01005)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

identifies three typical application modes (i.e., distributed assembly, unmanned collaborative factory, and dynamic production network) and examines the practical case of Zoomlion's intelligent factory for shared manufacturing, thereby illustrating the evolutionary changes at the task, system, and network levels driven by robot cluster control. The study also summarizes the future challenges confronting this paradigm transformation from technological (collaborative algorithms, real-time performance, reliability), industrial (standards, ecosystem, security), and strategic-implementation (technology supply, system integration, organizational execution) perspectives, and proposes targeted recommendations encompassing key technological breakthroughs, industrial ecosystem optimization, and strengthened strategic guidance. The findings contribute to deepening the integration of robot cluster control with intelligent manufacturing, and provide both theoretical interpretation and application-oriented support for the paradigm transformation of intelligent manufacturing systems.

Keywords: intelligent manufacturing; robots; cluster control; paradigm transformation; collaborative control; distributed computation

一、前言

当前，以新一代信息技术、人工智能（AI）技术、先进制造技术为核心驱动力，制造业逐步进入从传统自动化生产模式向高度智能化、网络化、柔性化生产形态转型的新发展阶段[1]。在此背景下，智能制造迅速发展，被普遍视为提升产业竞争力、推动经济高质量发展的战略举措。智能制造是融合应用先进制造技术、新一代信息技术的“人机物”一体化自主智能系统，不仅能够提高制造生产系统的柔性化与决策自动化水平，而且可以实现制造资源配置和生产过程反馈的效率倍增与动态优化[2-4]。我国将智能制造作为制造强国战略的主攻方向。《“机器人+”应用行动实施方案》（2023年）明确，研制和应用各类机器人（如焊接、装配、喷涂、搬运），建设智能制造示范工厂，助力制造业智能化变革。《“人工智能+制造”专项行动实施意见》（2026年）、《工业互联网和人工智能融合赋能行动方案》（2026年）等政策文件强调，推动AI、机器人与智能制造的深度融合与系统应用。

机器人集群控制指依托分布式感知、网络通信、任务分配、协同控制算法，构建面向多机器人的信息共享、状态协同、联合决策机制，支撑异构或同构机器人群体在统一目标约束下联合执行复杂制造任务的技术体系[5-6]。与单机器人作业系统不同，机器人集群控制系统具有规模可扩展、任务可分解、系统鲁棒性强等潜在优势，能够有效提升智能制造系统的动态调度、柔性响应、环境适应能力[7-8]。从技术发展历程看，机器人集群控制最早应用于无人系统与复杂环境任务领域，如无人机编队控制[9]、无人车辆协同运行[10]、自动化物流系统[11]等；得益于传感技术、通信技术、AI算法的快速发展，逐步具备更为强大的信息处理能力，推动机器人集群控制技术拓展应用于更为复杂的工程系统。

机器人技术赋能智能制造的研究重点主要是单机自动化[3]、产线集成化[5]、基于预设规则的调度优化[8-9]，围绕工业机器人的任务编排[6]、路径规划[11]、局部感知[12]也开展了较多探索与应用，形成了较为丰富的技术积累。然而，智能制造系统中机器人集群控制的理论内涵、运行逻辑、应用模式等仍是研究空白。当前的智能制造仍以预编程单机作业为主，机器人多以离散单元形式嵌入产线并严格遵循预设工艺路径与中心化调度逻辑[12]，导致构建面向复杂工况的群体协同、动态调度、全局资源优化体系难度较大。

本文以机器人集群控制为研究切入点，辨析机器人集群控制融入智能制造范式的发展现状与理论关联，建立机器人集群控制赋能智能制造范式转型的重构机制，提炼典型应用模式并面向一线的共享制造智能工厂开展应用探讨；从技术、产业、战略实施等层面识别机器人集群控制赋能智能制造范式转型的未来挑战，提出针对性的发展建议。本研究的贡献在于，采用集群控制的整体性视角，将分散的技术应用整合为面向制造生产系统层面的结构性分析框架，为智能制造范式转型提供理论解释与应用支撑。

二、相关概念背景

（一）智能制造范式的演进及现状

智能制造实践情景较为复杂，学术界与工业界尚未就智能制造的发展阶段、范式划分等形成完全统一的理论观点。有学者依据不同的理论视角与观察维度，从工业化进程视角、制造系统能力跃迁视角、技术融合层次视角对智能制造的演进范式进行了充分探讨。在工业化进程视角下，可将智能制造

置于机械化、电气化、信息化、智能化的历史演进脉络中进行定位，认为智能制造是第四次工业革命的核心技术[2]。在制造系统能力跃迁视角下，可将智能制造的发展历程划分为单元自动化、产线集成化、工厂智能化等层次，揭示了制造系统在信息集成范围、决策自主程度、协同复杂性等方面的能力跃迁，为制造系统从单机自动化向系统级集成化转变提供了理论借鉴[13]。此外，根据《2023—2024年中国智能制造产业发展报告》，智能制造被区分为自动化、信息化、互联化、智能化4个发展阶段，通常具有装备自动化、网络互联、智能决策等层级的系统能力[14]。

智能制造是持续演进、迭代提升的系统工程，采取新一代信息技术与先进制造技术融合的发展路径，以虚实融合、知识驱动、动态优化为支撑，推动设计、生产、管理、服务等传统制造环节的降本增效[15-16]。为此，有学者从技术融合层次视角出发并结合我国智能制造的发展背景与政策实践，提炼出智能制造三范式理论，即按照数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能化制造（新一代智能制造）3个阶段划分，深入诠释了智能制造范式的演进逻辑[17]。数字化制造的核心是应用仿真建模、数字孪生等数字技术，对产品、工艺、制造信息进行数字化表达，实现制造过程信息的数字化管理[18]。数字化网络化制造通过互联网技术应用以实现制造装备、控制系统、工业软件的数字化连接，促成企业内外部的资源协同、数据集成、流程优化[19-20]。数字化网络化智能化制造推动新一代AI技术与先进制造技术的融合应用，赋予制造生产系统以自主感知、自主决策、自主学习、自主执行的智能化能力[21-22]。当前，我国初步建成了覆盖不同成熟度层级的智能工厂梯度培育体系，相应的智能化应用正在从试点示范迈向规模化推广。

值得注意的是，随着制造规模的持续扩大、制造任务的趋于复杂，现有以“单机智能+中心化调度”为主导的智能制造范式仍面临着一定局限性。多数制造企业的智能化实践仍停留在单体设备应用层面，即机器人多以离散嵌入产线为主，相应任务执行依赖预设的工艺路径和中心化调度逻辑；在面对多品种、变批量的复杂制造场景时，单机设备之间的协同松散、资源配置固化、整体协同能力不足等问题导致制造生产系统难以实现跨单元、跨工序的快速响应与动态协同。可见，突破单机智能的边界，推动智能制造从单机设备驱动迈向群体协同驱动范式，成为亟待解决的关键课题。

（二）机器人集群控制的技术架构

当前，机器人集群控制正在从实验室验证向工业应用转化，机器人集群控制与智能制造场景进行融合应用将主要历经集群控制、工业赋能、范式转型3个层面的技术发展与演化迭代（见图1）。其中，集群控制层面主要解决不同机器人之间开展集群控制与协同运行的基础性命题，工业赋能层面主要解决机器人集群控制能力在工业场景中发挥赋能效用

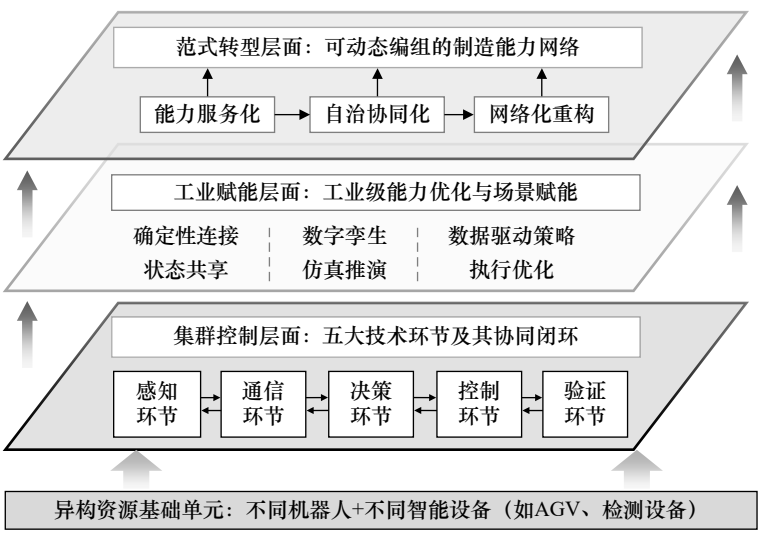


图1　机器人集群控制的技术架构

注：AGV表示自动导引车。

的关键问题，范式转型层面主要辨析机器人集群控制改变智能制造运行逻辑与基本范式的作用机理。

集群控制层面涉及“感知–通信–决策–控制–验证”主要技术环节的协同闭环（见表1），5个技术环节相互耦合并构成机器人集群控制与协同运行的基础性技术底座。① 感知层的核心技术有多源传感器融合感知、分布式协同定位，确保各个机器人基于自身的视觉、力觉、激光雷达等传感器获取局部环境信息，通过信息共享形成群体态势感知能力[23]。② 通信层的关键技术有工业确定性网络（如第五代移动通信（5G）与时间敏感网络（TSN）融合）、分布式通信协议、数据一致性机制，支持集群系统在毫秒级时延下的状态同步与指令交互[24]。③ 决策层涉及不同机器人之间的任务分配（MRTA）、多智能体强化学习（MARL）、共识式协商算法。基于共识的拍卖算法（CBBA）支持局部通信条件下的任务冲突消解与鲁棒分配，多智能体深度确定性策略梯度（MADDPG）、QMIX、多智能体近端策略优化（MAPPO）等算法提供了集中训练、分散执行的多机器人决策框架[25]，确保局部观测条件下不同机器人稳定开展协同学习与动作执行。④ 控制层的核心在于分布式协同控制算法，包括多机器人路径规划与冲突消解（如基于冲突的搜索（CBS）等多智能体路径规划方法），编队控制与队形重构，生成式视觉运动策略（如基于Transformer的动作分块（ACT）、扩散策略）等数据驱动型运动控制方法[26]。⑤ 验证层以数字孪生技术为支撑，通过虚实映射、在线仿真、状态回灌等开展集群控制策略的预验证与持续优化[27-28]。

在工业赋能层面，机器人集群控制主要通过确定性连接、数字孪生、数据驱动策略等技术路径，在工业场景中发挥稳定的赋能作用。确定性连接通过工业以太网、TSN、5G低时延高可靠通信、边缘计算的融合应用，实现高精度时间同步、确定性服务质量、低时延通信保障，确保不同机器人与智能设备之间的可信状态共享[29-30]。数字孪生以设备、工艺、订单、现场状态的虚实映射为核心，对任务迁移、路径切换、节拍调整、故障恢复等动态场景进行预测性仿真推演与执行数据分析，推动机器人集群控制形成可推演、可验证、可追溯的闭环优化模式[31-32]。数据驱动策略面向抓取、插接、双臂协同等高维精密操作的策略生成与执行优化，通过演示数据分析、连续动作序列生成来缓解复杂工序下的人工示教与调参压力[33-34]。将AI、5G、数字孪生等技术嵌入机器人集群控制的全过程，推动机器人集群控制能力从离线编程与中心化指令模式演变为可感知、可同步、可预测、可重构的工业级能力。

在范式转型层面，机器人集群控制通过能力服务化、自治协同化、网络化重构等技术逻辑，推动智能制造系统形成可动态编组的制造能力网络，促进智能制造范式转型。机器人集群控制以标准化任务语义、设备能力模型、实时状态为基础，将机器人、AGV/自主移动机器人（AMR）、检测设备、加工单元等异构制造资源视为可动态调用的能力单元，推动生产任务在多设备之间的灵活迁移，支持制造任务的模块化拆解、生产系统的快速重构[35-36]。不同机器人可在局部感知的基础上自主处理路径冲突、作业异常、任务再分配，实现多机器人的自治与协同运行[37-38]。此外，机器人集群控制将各个工位上的机器人、AGV、检测设备等异构资源进行虚

表1　机器人集群控制的基础性技术情况

发展阶段	技术重心	代表方法	制造应用
模块化机器人控制	感知、规划、控制分离	传统轨迹规划、比例–积分–微分或模型预测控制、规则调度	支撑固定工位自动化，但柔性和泛化能力有限
语言条件任务规划	由语言模型生成高层任务序列	SayCan、PaLM-E	支持机器人理解任务意图并进行可执行性筛选
“视觉–语言–动作”（VLA）模型	将视觉、语言、动作统一建模	RT-1、RT-2、RT-X	推动机器人从单任务策略转向跨任务泛化策略
生成式视觉运动策略	采用生成模型预测连续动作序列	ACT、扩散策略	增强复杂装配、精密抓取、插接、双臂协同操作能力
多机器人群体协同	多主体任务分配、路径冲突消解、协同决策	MRTA、CBBA、CBS、MADDPG、QMIX、MAPPO	支撑从单机器人作业到机器人集群协同的生产范式转变

拟整合与统一建模，同时搭建跨单元、跨区域、可动态调度的制造资源网络，支撑制造资源从静态配置转向网络化重构[39]。

（三）机器人集群控制与智能制造范式转型的理论关联

当前以单机智能为主导的智能制造范式可以提升制造生产效率，但存在多重系统性局限。基于单机绑定生产的制造系统生产单元多以相对独立的状态运行，导致不同生产单元之间协同关系松散，削弱了制造生产系统的整体柔性与自适应能力。现有制造生产系统的资源配置方式相对固化，致使构建面向制造全局优化的生产调度机制较为困难，在系统面临多品种、多批量、多变化的复杂制造场景时将难以开展跨单元、跨工序的快速响应与动态协同。

机器人集群控制为突破上述系统性局限提供了全新的技术要素支撑。区别于传统单机智能的运行逻辑，机器人集群系统能够较大程度地改变制造生产系统的运行模式。机器人集群控制可驱动制造生产任务从基于特定设备的刚性绑定模式逐步转向支持不同机器人任务分工及组合的动态协作模式，将改变智能制造生产的基本形态。机器人集群控制在智能制造生产过程中的影响效用不仅体现在效率层面的直接提升，而且可引发制造生产系统中决策结构、生产调度、资源配置等方面的变革。可见，机器人集群控制并非对单机智能范式的简单补充，而是推动智能制造全链条重构的关键力量，为智能制造范式转型提供了关键技术基础。

从群体智能理论角度看，专注于个体机器人独立运作的经典方法难以适应存在互动与协作需求的现实环境及其复杂需求，而大量无智能个体可通过简单的局部交互促成超越个体能力的全局智能行为[28]，这为理解机器人集群控制赋能智能制造范式转型提供了理论解释。一方面，机器人集群系统对局部自治能力提出了更高要求，每个机器人对局部信息的感知、采集、分析、决策效率提升都能够强化制造生产系统对动态环境的快速响应能力，进而强化机器人集群作业的稳定程度。另一方面，机器人集群控制技术能够推动制造生产系统迈向集群智能化形态，并非单机性能的线性叠加，而是通过全局任务分配优化、动态避障、节拍匹配等操作支撑系统性能的整体重构。为此，本研究力求揭示机器人集群控制赋能智能制造系统的重构机制，为智能制造范式转型提供理论依据与逻辑支撑。

三、机器人集群控制赋能智能制造范式转型的重构机制

在机器人集群系统与智能制造有机整合后，制造生产主体不再是中央指令下的被动执行单元，而是具有局部感知与自主决策能力的智能体。制造生产系统整体的协同能力、运行韧性与环境适应能力，将源于不同机器人之间以及与制造生产环境的实时交互，而非源于预设的全局模型。ISA-95标准是制造运营管理领域的权威模型，针对企业控制系统集成的功能层次提出了初步框架，也认为在制造系统运作过程中任务定义、决策分布、生产调度、资源配置等均发挥着重要作用。相应地，机器人集群控制对智能制造系统的重构涉及多个维度，核心在于揭示集群协同逻辑以突破单机范式的结构性局限。为此，本研究超越现有的单机智能与多机协同探索（多为调度算法改进、路径规划优化等单一维度的技术优化）层次，围绕任务执行逻辑、协同决策结构、生产调度模式、资源配置路径等关键环节，全面探讨机器人集群控制视角下智能制造系统运行逻辑的形成与发展（见图2）。

（一）任务执行逻辑重构

当前，机器人广泛用于智能制造系统中的装配、搬运、检测等生产作业环节[40-41]。随着机器人集群控制的迅速发展，制造任务的执行逻辑开始由单机绑定型作业结构转向“任务原子化–模块化编排”的协同作业结构。执行单一的复杂任务可表征为基于群体智能的分布式决策过程，不同的机器人个体通过局部感知、简单行为规则进行自组织交互，促进单一复杂任务解构为功能独立的原子化模块。此时，不同的机器人根据自身能力特征、设备状态、系统资源条件来动态承接相应模块，在系统层面形成多个机器人协同完成一个任务的运行结构。当制造系统面临多个并行生产任务时，机器人集群控制将在任务模块化拆解的基础上开展跨任务的模块重组与资源动态调配。例如，不同的生产任务均拆解为若干任务模块，制造系统根据各个机器人的实时状态、位置信息、作业能力，在多个生产

任务之间统筹调度机器人资源。这不仅有助于同一个机器人先后或交替参与不同任务中的模块执行，而且促进多个机器人形成临时协作单元以应对某一复杂任务的高峰需求。在此组织结构下，不同的机器人实际上形成动态协同关系；生产任务不再完全绑定于特定设备，而是以任务模块为基本单元进行组织。

（二）协同决策结构重构

在当前的智能制造系统中，机器人依托控制系统进行执行决策与作业控制，主要根据预先设定的控制程序执行既定任务，而运行决策位于设备控制层或生产管理系统层[42-43]。部分智能制造系统开始引入数据分析、智能决策等功能，但机器人之间在决策层面的协同能力仍然有限。制造生产系统中的决策逻辑多围绕单一设备运行状态展开，不同设备之间的协同关系主要通过调度系统进行协调。

当机器人集群控制嵌入制造决策流程后，机器人集群系统将逐步形成“局部自治–全局协同”的分层决策结构，即单个机器人基于本地感知进行快速响应，而在系统层上通过共享状态、协同规则建立全局任务一致性。不同机器人不仅可以通过通信网络共享任务信息、设备状态、环境信息，而且能够参与系统运行过程中的协同决策。此时，机器人集群系统根据生产任务需求、系统运行状态来形成协同决策关系。例如，当某个机器人通过视觉传感器检测到上游工序出现物料积压时，相关信息会通过工业网络实时同步至周边机器人、中央协同控制平台，其他机器人据此对自身作业节拍或路径规划做出动态调整，在系统层面表现为多主体协同运行的决策结构。基于协同决策机制，制造生产系统能够降低单一控制主体的决策压力，提升系统在复杂

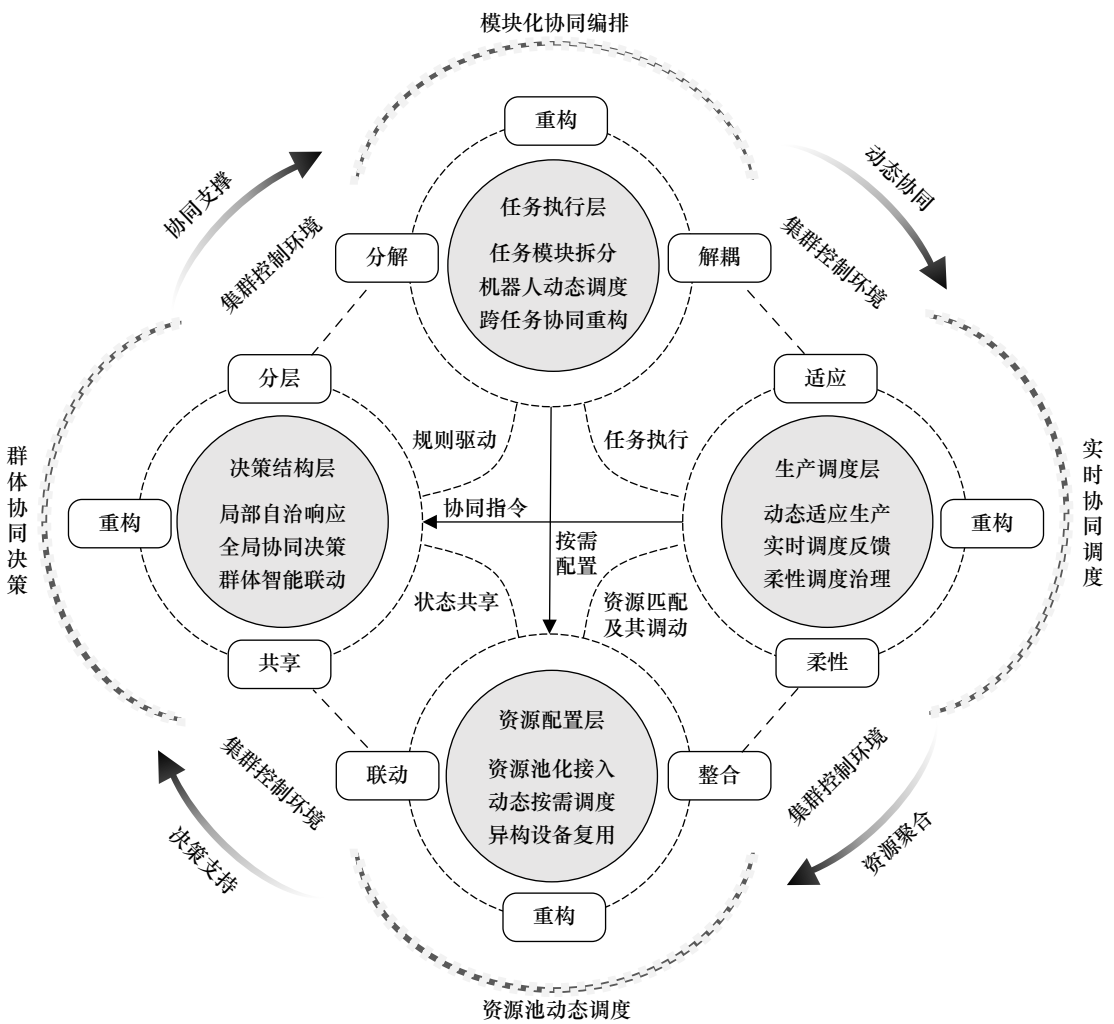


图2　机器人集群控制赋能智能制造范式转型的重构机制

生产环境中的适应能力。值得注意的是，该模式并不意味着完全排除人类参与。当制造生产系统检测到超出预设边界的异常工况时（如不同机器人之间的路径冲突无法消解、质量缺陷根因难以定位、设备故障引发级联风险），将主动向控制中心发出干预请求，再由操作人员基于全局信息进行态势研判与决策仲裁。以人机协同为基础的分层决策机制既可发挥集群系统在高频常规任务中的效率优势，也能保留人类在应对复杂情境时的认知灵活性。

（三）生产调度模式重构

当前，部分制造生产过程实现自动化与信息化，但生产任务安排仍依赖事前规划的生产调度方案。制造生产系统多通过生产管理系统或调度系统进行生产任务的统一安排，再根据生产流程将任务分配至不同的工业机器人[44-45]。机器人之间的协同关系在生产计划阶段即已确定，具体运行则围绕既定的调度逻辑展开。

基于群体智能驱动的机器人集群控制将促进制造系统的生产调度方式从静态预规划转向分布式自适应调度。机器人集群控制赋予机器人之间的实时信息交互能力，也重构制造系统的原有生产调度方式，支持制造系统对生产任务分配及其协同作业模块进行动态调整；不同的机器人通过通信网络获取系统运行信息，结合任务需求和设备状态参与生产任务执行。相应的协同调度机制可视为基于事件触发的自组织调度过程，赋予制造生产系统对任务插单、设备波动、工况扰动的在线感知、快速响应、动态修正能力。例如，装配机器人的力觉传感器检测到工件安装阻力异常后，该实时状态信息通过5G、TSN在毫秒级时间内同步至中央调度平台、周边的AMR；调度平台生成辅助方案，指挥附近的AMR携带备用夹具前往支援，同时调整后续工件的到达节拍以避免产线堵塞。通过机器人之间的协同调度，制造生产系统追求资源利用优化与生产效率提升，为复杂制造环境中的生产组织提供新的运行方式。

（四）资源配置路径重构

当前，智能制造系统多围绕单机器人作业单元配置生产资源，单台机器人多对应特定的生产任务，相应的作业能力、工艺路径、生产位置在制造系统规划阶段即基本确定。制造资源（包括机器人设备、工艺装备、物流单元）以工位为基本单位进行组织，生产任务需要围绕既有的固定资源能力进行规划，制造生产系统的资源配置呈现相对固定的结构特征[46-47]。

机器人集群控制与智能制造系统的融合发展推动制造生产系统资源配置方式从固定工位配置转向资源池动态调度。通过工业互联网平台、协同控制架构，将分散于各工位的机器人、AGV、数控机床、检测设备、工艺装备等异构制造资源进行虚拟化接入与统一建模，形成可动态调度的制造资源池。各类制造资源抽象为群体中可自主响应任务指令的能力单元，对应的状态、位置、能力、负载信息可视为群体共享信息并实时更新至系统层。在生产任务指令下达后，制造系统不再依赖固定的工位绑定关系，而是解析生产任务对工艺能力、承载精度、物流节拍的综合需求，从资源池中动态筛选、组合、调度所需资源，形成面向特定任务的资源配置方案。例如，新能源汽车电驱生产线接到一批高精度订单后，制造系统从资源池中识别出当前空闲的高精度装配机器人、配备视觉检测模块的自动化单元、处于低负载状态的AGV，临时组合为协同作业单元；任务完成后这些资源释放回资源池，等待面向新任务的重新配置。由此，制造生产系统支持制造资源在任务之间的灵活复用与优化配置，突破固定工位配置模式下的资源绑定约束。机器人集群控制既引导设备协同方式的变化，又推动制造资源由固定工位配置转向“资源池化–按需调度”一体化动态配置，为系统级资源优化提供新的实现路径。

四、机器人集群控制赋能智能制造范式转型的典型应用模式

机器人集群控制与智能制造范式的融合，将逐步革新多机器人协同模式在制造生产系统中的应用场景与实践样式（见图3）。从技术演进角度看，机器人集群控制赋能智能制造的关键是形成由具身智能基础模型、多机器人任务分配、路径冲突消解、多智能体强化学习、数字孪生系统支撑的复合技术体系。在不同的制造环境和生产需求条件下，机器人集群控制将逐步形成具有代表性的多样化应用模式，这些模式在生产组织方式、系统结构、协同机制等方面具有不同特征，也将反映机器人集群控制

对智能制造系统形态的潜在影响。结合当前的制造业实践来看，机器人集群控制赋能智能制造已有分布式装配模式、无人协同工厂模式、动态生产网络模式等典型形态。

（一）分布式装配模式

分布式装配主要面向复杂装备、电子产品、精密制造等，是机器人集群控制与智能制造场景融合的典型形态。复杂的装配任务拆解为多个可并行执行的子任务[48-49]，再由不同类型的机器人在协同控制平台上进行任务分配、状态同步并联合完成装配作业。分布式装配模式的前沿性体现在“任务建模–协同决策–运动执行”的耦合闭环。在任务建模层面，复杂装配过程拆解为搬运、定位、夹持、拧紧、插接、检测等可组合的装配原子任务，使装配流程可模块化重构。在协同决策层面，制造生产系统依据任务需求、机器人能力、工位约束进行动态匹配与联合规划，CBBA等算法支持局部通信条件下的任务冲突消解与鲁棒分配，CBS等规划方法保障共享空间中的无碰撞协同运动。在运动执行层面，应用ACT、扩散策略等生成式视觉运动策略，增强机器人对精密插接、柔性抓取、接触丰富操作的适应能力，推动装配执行由规则驱动转向数据驱动和示范学习驱动。

与传统的单一机器人或固定装配单元相比，分布式装配强调不同机器人的动态组合与并行协同，据此提升装配效率与系统柔性。机器人集群控制改变分布式装配模式的任务执行逻辑，促进形成基于协同化任务编排的运行方式。制造生产系统通过协同算法对复杂装配任务进行结构化拆解，划分为搬运、定位、夹持、装配、检测等具有明确功能边界的任务模块。不同类型的机器人根据自身能力特征、设备状态、系统资源条件，动态承接相应模块的操作执行任务，支持装配流程的并行化与节拍重构。当制造生产系统面临多个并行装配任务时，机器人集群控制在任务模块化拆解的基础上开展任务模块重组与资源动态调配，支持机器人在不同装配任务之间进行动态共享与灵活配置，从而将协同范畴从单任务多机器人拓展至多任务多机器人的复杂场景。

（二）无人协同工厂模式

无人协同工厂可在较少人工干预的条件下实现制造生产系统的连续稳定运行[50-51]，是机器人集群控制推动智能制造迈向高度自主化的重要形态。无人协同工厂模式的关键是形成面向全厂运行的群体

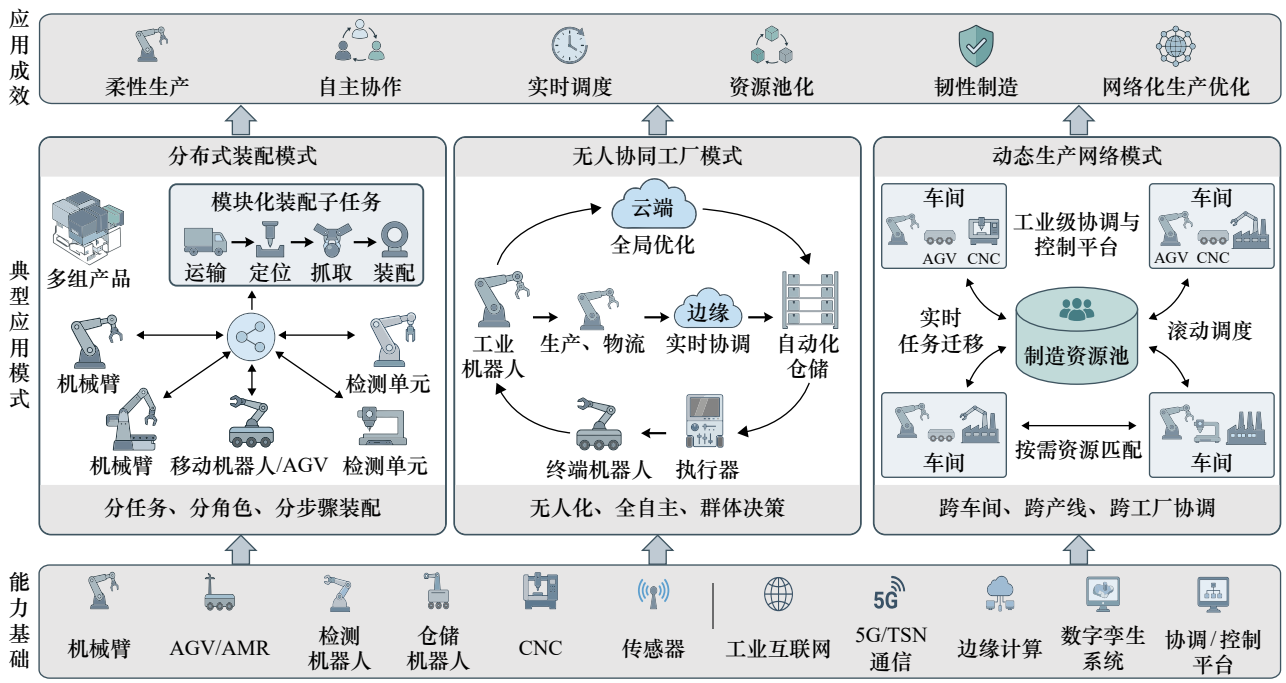


图3　机器人集群控制赋能智能制造范式转型的典型应用模式

注：CNC表示数控机床。

协同决策体系，以多智能体强化学习、“云边端”协同控制、VLA模型等为基础。由MADDPG、QMIX、MAPPO等算法构成集中训练、分散执行的机器人集群决策框架，不同机器设备可在局部观测条件下执行动作、在训练阶段利用全局信息开展协同策略学习。工业机器人、AMR、检测机器人、自动化仓储设备等异构装备通过工业网络、协同调度平台构成具有强制造能力的连续统一体，围绕生产、物流、检测、仓储等核心环节实施数据贯通与任务协同，形成全链条闭环运作的自动化生产环境。

机器人集群控制推动无人协同工厂在决策运行逻辑方面发生变革，逐步形成“局部自治–全局协同”的分层决策结构。在“云边端”协同架构下，云端负责全局优化与长期规划，边缘节点负责区域协同与实时响应，终端设备负责具体作业执行与状态感知；各层级通过工业网络进行状态共享与决策协同，形成基于分布式结构的群体协同决策机制。例如，在智慧生产车间中，装配机器人、AMR、检测机器人具有明确的任务分工，可通过系统协同来连续驱动并动态控制生产流程。通过多个机器人的协同运行，使制造生产系统在较少人工干预的情况下保持稳定运行，为未来智能工厂建设提供新的技术支撑。

（三）动态生产网络模式

随着智能制造系统的平台化与网络化发展，不同生产单元之间的协同关系更显重要[52-53]。机器人集群控制既可应用于单个生产车间，又能在更大范围内支持制造系统之间的协同运行以形成动态生产网络模式。动态生产网络模式是机器人集群控制从单厂应用拓展至网络化协同的高级形态，核心在于跨组织、跨车间、跨工厂开展制造资源的按需匹配与动态调度。分散于不同地理位置的生产单元通过工业互联网平台连接为统一网络，各单元将自身制造能力、设备状态、产能余量等信息实时上传至平台，形成制造能力资源池；当某一生产单元承接超出能力范围的任务时，平台根据任务需求、其他单元的实时能力，将部分子任务动态迁移至其他单元执行，促成跨单元的协同生产与资源配置优化。

在动态生产网络模式下，制造系统通过工业网络实时采集各生产单元的产能状态、设备负载、任务进度信息。当出现任务插单、设备波动、工况扰动时，制造系统可在线感知并快速响应，动态调整任务分配与机器人协同关系，形成面向事件触发与滚动优化的生产调度机制，适应生产运行中的异常情况。机器人集群控制将分散于各生产单元的机器人、AGV、数控机床等异构制造资源组织为面向动态调度的制造资源池：当生产任务到达时，从资源池中动态筛选、组合并调度所需资源，形成面向特定任务的瞬时资源配置方案；在生产任务完成后，将制造资源释放，确保灵活复用与优化配置。在该模式下，人类从单一工厂管理者逐步演变为网络化制造资源调度者，主要职责转化为制定跨工厂协同规则、审核系统生成的资源配置方案、在跨工厂协同出现冲突时进行顶层协调与仲裁决策。

（四）三种应用模式的递进关系

三种应用模式之间存在递进的关系。分布式装配模式聚焦工位 / 任务层的变化，重在将复杂装配任务拆解为可重组的任务模块，通过机器人集群控制开展并行执行，驱动制造任务从固定工序向任务模块的转变。无人协同工厂模式聚焦车间 / 系统层的变化，重在将装配单元、AMR、检测机器人、仓储系统连接为统一的运行系统，支持连续自治运行，驱动制造生产系统从集中控制向群体自治的转变。动态生产网络模式聚焦跨工厂 / 产业网络层的变化，重点推动单个工厂内部的机器人能力向网络化制造能力资源池转变，支撑跨组织、跨区域、跨能力单元的协同优化，驱动制造资源从工厂内部配置向网络化能力服务的转变。三种应用模式共同构成机器人集群控制赋能智能制造范式转型的变革路径，即“任务层→系统层→网络层”的资源重组与范式重构（见表2）。

（五）中联重科共享制造智能工厂的应用实践

中联重科共享制造智能工厂是长沙市中联智慧产业城土方机械园内建设的工程机械智能工厂，属于国家首批15家领航级智能工厂之一，成为以挖掘机全流程智能制造为主线、通过共性制造中心向起重机等多品类工厂开放共享能力的工程机械协同共享智能工厂集群的核心节点。工厂建设了61条高度柔性化的智能生产线，汇聚了20条无人化“黑灯产线”、2000多台工业机器人，依托“云边端”协同的工业互联网平台开展全厂生产资源的自组织、自

优化，实际运行过程完整呈现了机器人集群控制赋能智能制造任务层、系统层、网络层的发展模式变革。

机器人集群控制推动了工厂任务组织形式从设备绑定转向模块化编排，同时支持跨型号混线零切换。依托集群控制算法将复杂工艺流程拆解为可独立执行的模块化任务单元，指派焊接、装配、喷涂等机器人根据自身能力来动态承接不同的模块任务单元。AI产能引擎支持工厂6000多条工艺路线上的机器人开展任务实时组织与集群作业，换产时机器人和其他异构设备能够同步自主调整。实践表明，机器人集群控制促成了生产任务脱离特定的工位绑定，实现任务单元与机器人能力的有效匹配。

工厂构建了“云边端”分层决策架构，促进决策结构从中心化指令模式转向“局部自治–全局协同”模式。在底层机器人依托传感器进行实时反应式决策（响应时间为毫秒级），在中间层通过5G、TSN与邻近节点共享状态信息并支持区域级的冲突消解与协同决策，在顶层云端承担全局任务分解与长期规划（但不直接干预底层执行）。机器人集群控制将感知、判断、响应能力下沉至各个机器人节点，形成“分布式感知–区域协同–全局优化”的多层决策网络，保障智能制造系统在少人干预的情况下持续稳定运行。工厂部署了150个AI智能体、61个AI模型，为机器人集群控制下的分层决策提供了稳健的算力支持。

在资源配置方面，将机器人、AGV、数控机床、检测设备等异构制造资源在工业互联网平台上组合为可全域调度的制造能力资源池。开创性地构建了面向挖掘机、起重机、泵车、高空作业车的共享制造新模式，将挖掘机工厂的中厚板钢材下料中心、高强钢材下料中心、冲压中心的下料能力共享给其他3个主机工厂，显著降低了智能工厂集群的建设成本；当某个工厂面临产能高峰或设备异常时，制造生产系统根据任务需求、其他单元的实时能力，将部分子任务及对应的机器人作业方案动态迁移至低负载单元，任务执行完成后相关资源亦将释放回池中以供复用。在此过程中，制造资源从固定绑定模式转为能力服务模式，多个机器人集群从单厂专属设备转为网络共享资源，为跨组织、跨区域的协同制造提供了可用路径。

综上，中联重科共享制造智能工厂反映了机器人集群控制视角下包括工位级分布式装配、车间级无人协同工厂、产业网络级动态资源共享在内的智能制造范式变革。机器人集群控制赋能智能制造范式转型的本质是任务组织、决策结构、生产调度、资源配置的系统性重构，既有案例为多品种、小批量复杂装备的智能制造转型提供了验证后的实践样式，也为机器人集群控制赋能制造系统范式重构的理论拓展提供了实践支撑。

五、机器人集群控制赋能智能制造范式转型面临的挑战

从以单机器人作业为核心的既有智能制造范式向机器人集群控制赋能的新范式跨越，并非技术升级的线性延伸，而是制造生产系统运行逻辑的根本性变革。相关转型过程面临技术、产业、战略实施等层面的挑战。

（一）技术层面

在现有的智能制造系统中，机器人主要依托预

表2　三种典型应用模式的先进技术适配与范式转变关系

应用模式	典型技术	代表算法	模式应用	范式变革
分布式装配模式	多机器人任务分配、路径冲突消解、生成式视觉运动策略	扩散策略[33]、MRTA[54]、CBBA[55]、CBS[56]、ACT[57]	任务模块化拆解、算法匹配与路径规划、生成式精细操作	固定工位→模块化装配设备绑定→能力匹配
无人协同工厂模式	多智能体强化学习、“云边端”协同控制、VLA任务规划	MADDPG[58]、QMIX[59]、MAPPO[60]、PaLM-E[61]、RT-2[62]	“云边端”分层协同、全链条闭环运行、机器人群体自治	中心化指令→分层自治人工干预→群体自治
动态生产网络模式	跨工厂资源虚拟化、市场化任务分配、数字孪生推演、跨本体机器人学习	数字孪生驱动的智能制造[31]、CBBA[55]、Open X-Embodiment/RT-X[63]	资源虚拟化池化、跨工厂动态迁移、资源按需配置	单厂优化→网络能力池固定配置→按需协同

设程序或局部感知执行任务，机器人之间的协同关系简单且固化[64]。从单机器人控制向机器人集群控制模式跃迁后，相应技术体系的复杂程度显著增加。在机器人集群控制与智能制造系统有机整合后，技术层面将面临协同算法复杂、生产时延风险、故障级联失效等瓶颈。

在复杂动态环境中开展多机器人之间的高效任务分配与协同是最为紧迫的关键技术难题。机器人集群系统的任务分配、路径规划、冲突消解等均依赖高效的分布式协同算法，而当前研究多聚焦结构化条件下的编队控制与静态任务分工，忽略了制造场景中高耦合工序、共享作业空间、多约束并发执行等复杂协同问题，导致大规模集群条件下开展任务实时分解、路径冲突消解、多目标调度优化、“全局–局部”协同求解仍是受约束环节。

智能制造对生产节奏有着严格要求，协同延迟通常影响整体生产效率。机器人集群控制可能存在时延风险，从而干扰智能制造生产的持续稳定性。在机器人集群控制场景中，不同机器人之间的信息交互、决策协调、任务交接必然存在时延；尤其是机器人集群控制系统强调动态配置能力（根据实时生产状态快速调整协同关系、任务分工、资源组合），对通信实时性提出了极高要求，如任务迁移、临时协作单元组建、异常工况下的资源再分配等均需在毫秒级时间内完成，而现有的通信架构、控制协议在时延保障方面难以适应需求；当机器人规模扩大后，通信拥塞与处理延迟将进一步增加，动态配置的时效性面临更为严峻的挑战。构建面向集群制造场景的确定性低时延通信架构，在保障动态配置能力的同时控制通信拥塞、指令抖动、任务切换产生的延迟，成为系统设计与运行优化亟待突破的技术方向。

机器人集群控制的故障传播可能引发级联失效，进而威胁智能制造系统的持续稳定运行。机器人集群控制涉及大量的设备、传感器、控制节点，制造生产系统复杂度显著提升，单个机器人的异常行为可通过协同关系传导至整个系统进而引发级联失效。现有的可靠性设计方法主要针对单机设备或简单并联系统，在应对集群系统的故障传播方面能力不足。在部分设备、传感节点、通信链路失效的情况下，通过故障隔离、冗余接管、任务重分配等措施来维持制造生产系统的基本功能与安全边界，成为集群控制系统韧性能力提升面临的核心挑战。

（二）产业层面

在技术层面的挑战以外，制造领域的机器人集群控制面临产业层面的现实障碍，制约着技术成果向制造生产力转化的效率。

在产业标准方面，异构设备的标准体系缺失，阻碍了机器人集群系统的互联互动能力。以新能源汽车总装车间等高复杂离散制造场景为例，六轴工业机器人、AMR、协作机器人、视觉检测机器人等异构设备通常需要在同一工位或相邻区域开展协同作业，共同完成车门装配、物料配送、线束插接、质量检验等相互耦合的生产工序。然而，通信协议、数据接口、控制语义、任务描述等方面的统一标准缺乏[65]，导致异构设备之间的可插拔接入、语义级互认、高效协同难度较大，实际上成为制约机器人集群控制系统规模化部署的瓶颈。标准缺失也导致不同厂商的设备之间数据交换不畅，因系统层面的协同优化困难而阻碍了规模化应用进程。

在产业生态方面，产业链协同机制尚未形成，不利于机器人集群控制技术与智能制造应用场景的融合应用。智能制造场景对机器人集群控制系统的核心需求是适应多品种、变批量的生产模式，以解决传统单机作业下柔性不足、协同困难、响应滞后等痛点，具体表现为具备跨工序动态任务编排、复杂装配场景下的实时协同、异常工况下的快速自愈等能力。然而结合产业生态现状来看，相关需求并未得到有效响应。一方面，在机器人产业供给端，机器人集群控制系统涉及芯片、传感器、控制器、操作系统、算法平台、系统集成等，需要产业链上下游的协同供给，而面向制造场景系统级需求的联合开发与适配验证缺乏，未能形成集群解决方案。另一方面，在智能制造产业应用端，机器人集群控制系统的高前期投入、强技术壁垒等特征对制造企业的技术与管理能力提出了严苛要求，制造企业需要具有跨设备、跨系统的集成能力并建立与之匹配的工艺设计、运行维护、异常处置体系，面对柔性制造、协同生产等深层次需求时因缺乏系统性的产业生态支撑而难以实现技术落地。

在产业安全发展方面，机器人集群控制系统的运行安全涉及物理交互、网络安全、责任认定、科技伦理等维度，对智能制造管理体系的风险应对能

力提出了严格要求。在机器人协同作业场景中，各个机器人具有较强的物理交互和空间重叠程度，因而碰撞和操作风险随之提高；机器人集群控制系统高度依赖网络通信和数据交互，面临网络攻击、数据泄露等新型安全威胁。更关键的是，机器人集群控制系统具有分布式决策与联合执行特征，发生生产事故后责任不再局限于单一设备故障，而是涉及算法决策、系统集成、网络通信、现场管理等多重主体，导致算法“黑箱”、决策可追溯性缺失等科技伦理问题（即生产决策权由人类部分转移至自主协同算法后，产生算法偏误、责任归属模糊、风险分配不公等伦理风险）。

（三）战略实施层面

推动机器人集群控制赋能智能制造范式转型，不仅需要明确技术演进和产业变革的基本方向，而且需要重视转型过程中面临的结构性困境。这些困境并非单纯的技术瓶颈，而是技术成熟度、产业能力、组织惯性、经济逻辑交互后形成的系统性障碍，将对智能制造范式转型的路径选择与发展过程产生显著影响。

面向智能制造场景应用的机器人集群控制技术处于从实验室验证向工业应用转化的发展阶段，在复杂制造环境中的稳定性、可靠性、场景适应性需要持续迭代与规模化验证。然而，多数制造企业受效率压力、成本约束的驱动而对协同制造技术应用提出了现实需求，但因技术成熟度不足、应用风险较高而难以迈出实质性步伐。当前技术供给、产业采纳之间存在结构性张力，制造企业容易陷入技术观望和风险承担之间的权衡困境。

国内在机器人本体、控制算法、核心零部件等单点技术上已形成了初步积累，但各类技术整合为系统解决方案的集成能力依然不强。机器人集群控制系统的性能取决于单项技术的先进性、技术模块之间的匹配度与协同效率，而技术模块的标准化接口与协同机制缺失，各技术单元在耦合过程中易产生适配损耗与通信壁垒，也就弱化了集群系统的协同增益。单点技术积累、系统集成能力之间的非对称发展逐步引发“技术孤岛”现象，成为智能制造产业的技术发展战略困境。

组织惯性和复合型人才缺口成为组织和执行制造范式转型的隐性壁垒。机器人集群控制赋能的智能制造范式转型不仅是技术系统的升级，更是对制造企业组织架构、管理流程、人员技能的全面重塑。在组织层面，传统的制造企业在长期实践中形成的科层制管理结构、刚性生产流程，难以适配集群协同制造所需的扁平化、自组织、动态决策特征。在人才层面，集群系统的规划、部署、运维要求从业人员具有跨学科知识结构并掌握机器人控制、工业网络、工艺机理、数据分析等复合技能。然而，制造企业普遍缺乏复合型工程技术人才，难以有效应对集群系统的柔性配置及其异常处置，导致机器人集群控制系统的运作效能难以充分发挥。

六、机器人集群控制赋能智能制造范式转型的发展建议

（一）加强技术攻关以突破协同瓶颈

针对协同算法复杂、时延保障不足、可靠性设计欠缺等技术瓶颈，从算法研发、通信架构、韧性设计等维度联合开展技术攻关。

突破传统结构化环境下的集群编队控制能力局限，面向总装、焊接、质检等高耦合工序场景，开发支持万节点规模的分布式实时任务分配与路径规划算法，重点攻关任务动态分解、空间冲突消解、多目标优化求解等技术难点。可依托国家制造业创新中心等行业平台，建设开放算法验证平台，集成数字孪生仿真、硬件在环测试等功能，加快集群控制技术成果由单点突破向系统解决方案转化。

针对任务迁移、临时协作组建等动态配置对时延的严苛要求，在重点制造集聚区优先部署 5G 与 TSN 融合的工业确定性网络，构建边缘算力节点、统一数据命名空间，将机器人集群的端到端通信时延控制在 1~5 ms、抖动<50 μs。制定面向机器人集群控制场景的通信协议、时间同步标准，明确机器人集群控制系统在任务切换、异常重配等动态行为下的通信服务质量保障等级，缓解通信指令拥塞与同步偏差。

针对机器人集群中故障传播的复杂性，开发故障传播图建模与隔离策略，支持部分设备、传感器、通信链路失效时制造生产系统在秒级时间内自动完成故障定位、冗余接管、任务重分配。研究“功能安全 – 信息安全”融合的韧性设计方法，建设国家级机器人系统可靠性测试认证平台，在典型

产线上开展故障注入验证，形成涵盖故障检测、恢复决策、安全边界的标准化评估体系。

（二）重塑产业生态并强化系统集成

针对异构设备互操作困难、产业生态薄弱、安全伦理风险突出等障碍，从标准体系、协同机制、治理框架等层面协同强化能力。

研究和制定异构设备互操作标准，破解智能制造场景中机器人集群的“数据孤岛”瓶颈。围绕通信协议、数据接口、控制语义、任务描述，制定国家级或行业级的机器人集群控制技术标准，形成覆盖设备层、控制层、系统层、应用层的完整标准体系。优先在新能源汽车、电子信息等重点工业方向开展标准验证与试点应用，推动异构机器人的可插拔接入、语义级互认、高效协同。

针对供给端技术耦合度不高、需求端集成能力不强的情况，可由行业龙头企业、科研院所联合组建面向机器人集群控制与智能制造的产业创新联盟，覆盖从机器人本体、核心控制器、操作系统、算法平台到整厂集成商的全链条，精准推动机器人集群控制赋能智能制造范式转型的协同攻关与适配验证。可重点培育数家具备整厂级集群系统集成能力的解决方案供应商，同步建立工艺设计、运行维护、异常处置等配套能力体系。

针对机器人集群控制系统的物理交互风险、网络安全威胁、科技伦理问题，研究和建立面向集群制造的安全监管框架与认证制度。论证和制定“多机器人协同作业安全设计指南”，明确物理交互区域的碰撞防护、紧急停车、权限管理要求。强制部署轻量级加密通信与入侵检测模块，前瞻应对网络攻击与数据泄露风险。建立算法审计规范与责任追溯机制，要求集群控制系统记录关键决策日志并支持事后审计，以有效应对算法“黑箱”与责任认定难题。鼓励专业金融机构提供保险共担机制，在有效分散应用风险的同时为制造企业提供稳定的法律预期。

（三）强化战略引导来破解转型困境

针对技术供给与产业采纳错位、单点技术与系统集成能力不匹配、组织惯性与人才缺口的现实困境，联合开展示范引领、集成能力建设、管理变革，为从技术研发到规模化落地提供全面保障。

鉴于技术成熟度不足、企业应用风险顾虑并存的结构性张力，可率先在航空航天、新能源汽车、电子信息等重点工业方向建设“1个全场景标杆工厂+*N*个工序级协同验证线”，论证提出可量化的示范工程绩效指标（如生产节拍提升15%以上、异常响应时间降低40%以上）。通过示范项目积累技术验证数据包、最佳实践案例集，形成从工艺设计、系统集成、运行评估到经济性分析的标准化推广范式。

面对单点技术积累、系统集成能力的非对称发展格局，可建设产业创新联盟与公共服务平台，研发技术模块之间的标准化接口与协同机制，降低各技术单元在耦合过程中的适配损耗与通信壁垒。支持机器人本体、控制算法、核心零部件等优势企业向系统集成延伸，培育具有完整集群解决方案供给能力的龙头企业。可择机设立智能制造专项基金，以股权投资、专项贷款等形式支持制造企业开展设备层面的集群智能化更新，合理缓解前期投入压力，推动从单点技术应用向系统级协同的跃迁。

将管理变革、人才战略纳入智能制造转型的顶层设计。在组织层面，鼓励制造企业设立扁平化的集群制造运营单元，建立基于实时状态感知的动态决策流程，更新配套的绩效考核与容错机制。在人才层面，鼓励高校、职业院校、龙头企业共建机器人集群制造产教融合基地，开设机器人控制、工业边缘计算、制造系统集成等交叉课程，实施“工程师+技师”双元制培养；为企业技术人员提供集群系统运维与异常处置专项培训，壮大具有集群系统规划与调试能力的复合型工程师队伍。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 5, 2026; **Revised date:** July 30, 2026

Corresponding author: Zhou Xinmin is a professor from the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University of Technology and Business. His major research fields include big data, artificial intelligence, AI large models. E-mail: zhouxinmin2699@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Strategic Layout and Implementation Path of Future Key Industries to Promote the Development of New Quality Productivity” (2025-XBZD-14), “Research on Innovation Evaluation and Development Strategy of Start-ups Based on Tiankai Higher Education Innovation Park” (25ZLGCSS00070), “Research on the Utilization of Big Data and the Development of Digital Economy in Hunan Province” (2025WK1007); Xiangjiang Laboratory Project (24XJJCYJ01005)

参考文献

[1] 陈晓红，蓝澜，周志方. 人工智能赋能未来产业发展的内在逻辑与实现路径[J]. 中国工程科学，2025，27(5)：249-259.
Chen X H，Lan L，Zhou Z F. Internal logic and implementation pathway of artificial intelligence empowering the development of future industries[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(5)：249-259.

[2] Zhou J，Zhou Y H，Wang B C，et al. Human－cyber－physical systems（HCPSs）in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering，2019，5(4)：624-636.

[3] 袁礼伟，王耀南，谭浩然，等. 面向智能制造的自主可控工业互联网发展研究[J]. 中国工程科学，2025，27(3)：38-53.
Yuan L W，Wang Y N，Tan H R，et al. Independent and controllable industrial Internet for intelligent manufacturing[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(3)：38-53.

[4] 陶云清，黄卓，刘兆达，等. 智能制造提升了企业投资效率吗?[J]. 管理科学学报，2026，29(1)：91-112.
Tao Y Q，Huang Z，Liu Z D，et al. Can intelligent manufacturing empower corporate investment efficiency?[J]. Journal of Management Sciences in China，2026，29(1)：91-112.

[5] Liu S R，Shen J X，Tian W，et al. Balanced task allocation and collision-free scheduling of multi-robot systems in large spacecraft structure manufacturing[J]. Robotics and Autonomous Systems，2023，159：104289.

[6] 张树忠，齐春雨，张弓，等. 异构三机器人协同搬运的高柔顺性研究[J]. 工程科学学报，2025，47(10)：2049-2058.
Zhang S Z，Qi C Y，Zhang G，et al. High flexibility of heterogeneous tri-robot collaborative handling[J]. Chinese Journal of Engineering，2025，47(10)：2049-2058.

[7] Zhou X，Wen X Y，Wang Z P，et al. Swarm of micro flying robots in the wild[J]. Science Robotics，2022，7(66)：eabm5954.

[8] 袁瑞萍，姜盈帆，司林胜，等. 基于分层深度强化学习的多机器人任务分配和路径规划联合优化研究[J]. 系统工程理论与实践，2026，46(6)：2547-2569.
Yuan R P，Jiang Y F，Si L S，et al. A novel joint optimization method for multi-robot task allocation and path planning based on hierarchical deep reinforcement learning[J]. Systems Engineering-Theory & Practice，2026，46(6)：2547-2569.

[9] Kloster K，Moeini M，Vigo D，et al. The multiple traveling salesman problem in presence of drone- and robot-supported packet stations[J]. European Journal of Operational Research，2023，305(2)：630-643.

[10] Westfechtel T，Ohno K，Mizuno N，et al. Parking spot estimation and mapping method for mobile robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters，2018，3(4)：3371-3378.

[11] Choi B，Kim M，Kim H. An optimization framework for allocating and scheduling multiple tasks of multiple logistics robots[J]. Mathematics，2025，13(11)：1770.

[12] 吴昊天，王耀南，朴玄斌，等. 智能制造工业机器人技术应用及发展趋势[J]. 中国工程科学，2025，27(3)：83-97.
Wu H T，Wang Y N，Piao X B，et al. Application and development trends of industrial robot technologies in intelligent manufacturing[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(3)：83-97.

[13] 柴天佑，钱锋，管晓宏，等. 面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术[J]. 中国科学基金，2024，38(4)：560-570.
Chai T Y，Qian F，Guan X H，et al. Theory and technology of automation and intelligence for dual carbon target[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2024，38(4)：560-570.

[14] 夏杰长，苏敏. 以数实融合推动现代化产业体系建设[J]. 改革，2024(5)：12-23.
Xia J C，Su M. Promoting the construction of modern industrial systems through the integration of digital and real-world industries[J]. Reform，2024(5)：12-23.

[15] Lu Y Q，Xu X，Wang L H. Smart manufacturing process and system automation—A critical review of the standards and envisioned scenarios[J]. Journal of Manufacturing Systems，2020，56：312-325.

[16] 袁依格，何卓丰，李威，等. 具身智能驱动的智能制造应用发展研究[J]. 中国工程科学，2025，27(3)：67-82.
Yuan Y G，He Z F，Li W，et al. Development of intelligent manufacturing driven by embodied intelligence[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(3)：67-82.

[17] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程，2015，26(17)：2273-2284.
Zhou J. Intelligent manufacturing—Main direction of “made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering，2015，26(17)：2273-2284.

[18] Thakuri P K，Alkki L，Aarikka-Stenroos L. Digital technologies enabling component reuse in circular value chains：Using digital twin，Internet of things and robots in construction and manufacturing sectors[J]. R&D Management，2025，55(4)：1161-1216.

[19] 吕文晶，陈劲，刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究[J]. 中国软科学，2019(7)：1-13.
Lyu W J，Chen J，Liu J. Intelligent manufacturing and firm-level platform building in industrial Internet：A case study of haier[J]. China Soft Science，2019(7)：1-13.

[20] 裴军，周娅，彭张林，等. 高端装备智能制造创新运作：从平台型企业到平台型供应链[J]. 管理世界，2023，39(1)：226-240.
Pei J，Zhou Y，Peng Z L，et al. The innovative operation of high-end equipment smart manufacturing：From platform-based enterprise to platform-based supply chain[J]. Journal of Management World，2023，39(1)：226-240.

[21] 苏波，李培根，瞿国春，等. 我国智能制造发展十年回顾总结与未来展望[J]. 中国工程科学，2026，28(1)：48-57.
Su B，Li P G，Qu G C，et al. Ten-year review and future prospect of intelligent manufacturing development in China[J]. Strategic Study of CAE，2026，28(1)：48-57.

[22] Chen N，Zhang S W，Zhou X B，et al. CuIoT：Advancing network connectivity with motif knowledge-centric for robust topology[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering，2026，38(7)：4213-4226.

[23] Giribet J I，Colombo L J，Moreno P，et al. Dual quaternion cluster-space formation control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters，2021，6(4)：6789-6796.

[24] Chen J，Chen M J，Wang J，et al. Distributed multi-robot active gathering for non-uniform agriculture and forestry information[J].

Frontiers in Plant Science，2025，16：1699124.

[25] Krejčí J，Babiuch M，Babjak J，et al. Implementation of an embedded system into the Internet of robotic things[J]. Micromachines，2023，14(1)：113.

[26] Wang S，Huang X，Xia M Y，et al. Does artificial intelligence promote firms' innovation efficiency：Evidence from the robot application[J]. Journal of the Knowledge Economy，2024，15(4)：16373-16394.

[27] Bonabeau E，Dorigo M，Theraulaz G. Swarm intelligence：From natural to artificial systems[M]. Oxford：Oxford University Press，1999.

[28] 董玉成，范莎，陈霞，等. 诺贝尔经济科学奖与决策理论及其对数据驱动智能决策的研究启示[J]. 管理科学学报，2025，28(4)：174-190.
Dong Y C，Fan S，Chen X，et al. Nobel Memorial Prize in economic sciences & decision theory and its implications for data-driven intelligent decision-making [J]. Journal of Management Sciences in China，2025，28(4)：174-190.

[29] Vitturi S，Zunino C，Sauter T. Industrial communication systems and their future challenges：Next-generation ethernet，IIoT，and 5G[J]. Proceedings of the IEEE，2019，107(6)：944-961.

[30] Cavalcanti D，Perez-Ramirez J，Rashid M M，et al. Extending accurate time distribution and timeliness capabilities over the air to enable future wireless industrial automation systems[J]. Proceedings of the IEEE，2019，107(6)：1132-1152.

[31] Lu Y Q，Liu C，Wang K I，et al. Digital twin-driven smart manufacturing：Connotation，reference model，applications and research issues[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2020，61：101837.

[32] Jones D，Snider C，Nassehi A，et al. Characterising the digital twin：A systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology，2020，29：36-52.

[33] Chi C，Xu Z J，Feng S Y，et al. Diffusion policy：Visuomotor policy learning via action diffusion[J]. The International Journal of Robotics Research，2025，44(10/11)：1684-1704.

[34] Ravichandar H，Polydoros A S，Chernova S，et al. Recent advances in robot learning from demonstration[J]. Annual Review of Control，Robotics，and Autonomous Systems，2020，3：297-330.

[35] Wang B C，Tao F，Fang X D，et al. Smart manufacturing and intelligent manufacturing：A comparative review[J]. Engineering，2021，7(6)：738-757.

[36] Fragapane G，Ivanov D，Peron M，et al. Increasing flexibility and productivity in industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics[J]. Annals of Operations Research，2022，308(1)：125-143.

[37] Zhang Y，Zhu H H，Tang D B，et al. Dynamic job shop scheduling based on deep reinforcement learning for multi-agent manufacturing systems [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2022，78：102412.

[38] Zhou T，Tang D B，Zhu H H，et al. Multi-agent reinforcement learning for online scheduling in smart factories[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2021，72：102202.

[39] Chakraa H，Guérin F，Leclercq E，et al. Optimization techniques for multi-robot task allocation problems：Review on the state-of-the-art[J]. Robotics and Autonomous Systems，2023，168：104492.

[40] Chai G F，Xia Y Z. Multi-robot path optimization and simulation for multi-route inspection in manufacturing[J]. International Journal of Simulation Modelling，2023，22(1)：121-132.

[41] 邓玉萍，吴麟，刘佳美. 外资并购与智能制造——基于工业机器人应用视角[J]. 南开经济研究，2025(4)：208-226.
Deng Y P，Wu L，Liu J M. Foreign mergers and intelligent manufacturing：A perspective from industrial robot applications[J]. Nankai Economic Studies，2025(4)：208-226.

[42] 刘永奎，王芊骥，朱子璐，等. 具身智能工业机器人：体系架构、关键技术与案例研究[J]. 计算机集成制造系统，2025，31(12)：4513-4541.
Liu Y K，Wang Q J，Zhu Z L，et al. Embodied artificial intelligent industrial robot：System architecture，key technologies and case study[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2025，31(12)：4513-4541.

[43] Vásárhelyi G，Virágh C，Somorjai G，et al. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments[J]. Science Robotics，2018，3(20)：eaat3536.

[44] Nielsen I，Dung D N A，Banaszak Z A，et al. Material supply scheduling in a ubiquitous manufacturing system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2017，45：21-33.

[45] 谢康，胡杨颂，刘意，等. 数据要素驱动企业高质量数字化转型——索菲亚智能制造纵向案例研究 [J]. 管理评论，2023，35(2)：328-339.
Xie K，Hu Y S，Liu Y，et al. Data factor driven high-quality digital transformation of enterprise—A longitudinal case study of Sogal's intelligent manufacturing[J]. Management Review，2023，35(2)：328-339.

[46] 彭华荣，徐佳，凌可. 智能制造诱发的能源回弹效应研究[J]. 系统工程理论与实践，2026，46(4)：1579-1600.
Peng H R，Xu J，Ling K. A study on the energy rebound effect induced by intelligent manufacturing[J]. Systems Engineering-Theory & Practice，2026，46(4)：1579-1600.

[47] Inkulu A K，Bahubalendruni M V A R. Optimal resource allocation for multiple shop floor tasks in collaborative assembly[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，185：109695.

[48] 李彦征，陈浩，赵文政，等. 多工位多机器人装配过程的分布式点焊任务分配方法[J]. 计算机集成制造系统，2023，29(3)：781-788.
Li Y Z，Chen H，Zhao W Z，et al. Distributed spot welding task allocation for multi-station multi-robot assembly process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2023，29(3)：781-788.

[49] Si B W，Chang L Y，Li S，et al. Self-reconfigurable robotic fish swarms：Collective achievement of diverse locomotion and challenging aquatic tasks[J]. Science Advances，2026，12(2)：eadz2458.

[50] 刘香港，史占中. “数字+算法”融合驱动的智能制造研究述评与展望[J]. 外国经济与管理，2026，48(5)：38-55.
Liu X G，Shi Z Z. A review of research on intelligent manufacturing driven by “digital + algorithms” integration and prospects[J]. Foreign Economics & Management，2026，48(5)：38-55.

[51] Bao N S，Yang Y P，Fan Y C，et al. Optimising apparel production in industry 5.0 using a human-centric flexible manufacturing approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2025，139(3)：1881-1895.

[52] Jiao R，Commuri S，Panchal J，et al. Design engineering in the age of industry 4.0[J]. Journal of Mechanical Design，2021，143(7)：070801.

[53] Fan L Y，Zhang L. Multi-system fusion based on deep neural network and cloud edge computing and its application in intelligent manufacturing[J]. Neural Computing and Applications，2022，34(5)：3411-3420.

[54] Gerkey B P，Matarić M J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. The International Journal of Robotics Research，2004，23(9)：939-954.

[55] Choi H L，Brunet L，How J P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation[J]. IEEE Transactions on Robotics，2009，25(4)：912-926.

[56] Sharon G，Stern R，Felner A，et al. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding[J]. Artificial Intelligence，2015，219：40-66.

[57] Zhao T Z，Kumar V，Levine S，et al. Learning fine-grained bimanual manipulation with low-cost hardware[C]//Robotics：Science and Systems，2023：1-19.

[58] Lowe R，Wu Y，Tamar A，et al. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments[C]//Advances in Neural Information Processing Systems，2017：1-12.

[59] Rashid T，Samvelyan M，Schroeder W C，et al. QMIX：Monotonic value function factorisation for deep multi-agent reinforcement learning[C]//Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning，2018：1–51.

[60] Yu C，Velu A，Vinitsky E，et al. The surprising effectiveness of PPO in cooperative multi-agent games[C]//Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems，2022：1-14.

[61] Wang Y，Jin K，Liu W. Multimodal language data and platform construction for LCTLs teaching[C]//Proceedings of the 2023 15th International Conference on Machine Learning and Computing，2023：227-232.

[62] Brohan A，Brown N，Carbajal J，et al. RT-2：Vision-language-action models transfer web knowledge to robotic control[C]//Proceedings of the 7th Conference on Robot Learning（CoRL 2023），2023：1–16.

[63] O'Neill A，Rehman A，Gupta A，et al. Open X-embodiment：Robotic learning datasets and RT-X models[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation（ICRA），2024：6892-6903.

[64] Nambiar S，Paul R C，Ikechukwu O C，et al. Digital twin-enabled adaptive robotics：Leveraging large language models in Isaac Sim for unstructured environments[J]. Machines，2025，13(7)：620.

[65] Park Y K，Park J，Kim S，et al. Development of digital twin for plug-and-produce of a machine tending system through ISO 21919 interface[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing，2023，36(10)：1449-1464.