

多机器人协同作业系统在汽车制造中的关键技术研究

李云鹤

大众汽车（安徽）有限公司，安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/ME.2025120005

摘要：本文围绕汽车制造多机器人协同作业系统展开，涵盖总体设计、模块化功能系统构建、多目标优化控制等内容。介绍视觉 – 力觉融合定位等技术，阐述数字孪生系统实现路径、异构设备通讯协议转换等要点，还提及预测性维护等体系建设，实际应用成效显著，对汽车制造智能化发展意义重大。

关键词：多机器人协同作业系统；汽车制造；数字孪生

Research on Key Technologies of Multi Robot Cooperative Operation System in Automobile Manufacturing

Li Yunhe

Volkswagen (Anhui) Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000

Abstract : This paper focuses on the automobile manufacturing multi robot cooperative operation system, covering the overall design, modular function system construction, multi-objective optimization control and so on. This paper introduces the technology of vision force integration positioning, expounds the key points such as the realization path of digital twin system and the conversion of heterogeneous device communication protocol, and also mentions the system construction such as predictive maintenance, which has achieved remarkable results in practical application and is of great significance to the development of intelligent automobile manufacturing.

Keywords : multi robot cooperative operation system; automobile manufacturing; digital twins

引言

《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》明确提出要提升新能源汽车智能制造水平，推动汽车产业转型升级。在此政策导向下，汽车制造领域的多机器人协同作业系统研究至关重要。该系统需构建全面的作业体系，考虑工艺特点与需求，合理布局工作站并匹配生产节拍。要搭建模块化功能系统，实现设备互联与高效通信，开发核心算法库提升作业效率与安全性。还应运用多目标优化控制技术兼顾生产效率与能耗，集成视觉 – 力觉融合定位技术满足焊接精度要求，通过数字孪生、协议转换、边缘计算等实现高效运行与监控，建设预测性维护、能效监控优化等体系提升设备管理与能源利用效率，集成MES系统与构建质量追溯系统优化生产流程与提升产品质量，从而推动汽车制造向智能化、高效化发展。

一、多机器人系统架构设计

（一）汽车制造场景的总体设计

在汽车制造场景下进行多机器人系统架构的总体设计，需构建一个全面覆盖装配、焊接、涂装这三大关键工艺的多机器人作业体系。此体系的构建，要充分考虑各工艺环节的特点与需求，确保机器人之间协同作业的高效性与准确性。明确工作站布局时，应依据汽车制造流程，合理规划各机器人工作站的位置，以实现物料流转的顺畅与高效^[1]。同时，生产节拍匹配原则至关重要，需精准测算每个工艺环节的作业时间，使各机器人的工作节奏协调一致，避免出现等待或积压的情况，从而提升整个汽车制造生产线的生产效率，满足大规模、高质量的汽车生产需求。

（二）模块化功能系统构建

多机器人系统架构设计的模块化功能系统构建，需紧密围绕汽车制造场景展开。设计基于OPC UA的设备互联框架，实现多机器人及相关设备间的高效、稳定通信^[2]。该框架能打通机器人与各类生产设备的数据交互通道，确保信息实时流通。同时，开发核心算法库，其中任务分配算法根据汽车制造任务特点与机器人性能，合理分配工作任务，提升整体作业效率；碰撞规避算法通过实时监测机器人位置与运动状态，动态规划路径，防止机器人在作业过程中发生碰撞，保障生产安全；工艺补偿算法依据汽车制造工艺标准，对机器人作业偏差进行精准补偿，提高产品制造精度。这些模块化功能系统相互协作，共同支撑多机器人在汽车制造中的协同作业。

二、协同作业关键技术研究

(一) 多目标优化控制技术

多目标优化控制技术聚焦于在汽车制造多机器人协同作业场景下，同时兼顾多个相互冲突的目标。研发基于动态优先级调度的任务分配模型，旨在依据任务的紧急程度、复杂程度以及机器人的当前状态等动态因素，合理分配任务，提升任务执行效率。而建立设备利用率与能耗比综合评价指标体系，是为全面评估机器人在执行任务过程中的资源利用情况。设备利用率关乎生产效率，能耗比则影响生产成本，两者相互关联又彼此制约。通过此综合评价指标体系，可实现对机器人作业过程的精准调控，以达到提高设备利用率、降低能耗的双重目标，确保多机器人协同作业系统在汽车制造中能更高效、更节能地运行^[3]。

(二) 视觉-力觉融合定位技术

在汽车制造白车身焊接过程中，毫米级定位精度要求极高。为此，多机器人协同作业系统集成3D视觉引导与六维力觉反馈系统，形成视觉-力觉融合定位技术。3D视觉引导系统能够快速获取白车身的空间位置信息，凭借高分辨率的视觉传感器，精确识别焊接部位的特征点与轮廓^[4]。六维力觉反馈系统则实时感知焊接过程中的力的变化，如焊接枪与工件接触时的压力、摩擦力等。通过将视觉信息与力觉信息进行深度融合，一方面依据视觉信息进行初步定位，另一方面利用力觉反馈实时调整焊接位置，从而确保焊接点精准度，有效满足白车身焊接毫米级定位精度要求，提升焊接质量与效率，保障汽车制造的整体品质。

三、数字孪生系统实现路径

(一) 虚实映射建模方法

1. 设备物理实体建模

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，设备物理实体建模至关重要。需建立包含运动学参数、动力学特性及传感器配置的机器人数字模型库。针对运动学参数，精确测量机器人各关节的转动范围、速度、加速度等，为其运动模拟提供准确依据。对于动力学特性，分析机器人在不同负载、运动状态下的受力情况，明确其动力输出与能耗特点。而传感器配置方面，需确定位置传感器、力传感器等的类型、精度及安装位置，以实时反馈机器人作业状态。这些信息共同构成机器人数字模型库，实现物理实体到虚拟模型的准确映射，为多机器人协同作业的优化与监控提供基础^[5]。

2. 制造过程数字孪生

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，虚实映射建模方法下的制造过程数字孪生，借助工艺参数驱动的生产模拟系统来达成。通过精准采集汽车制造过程中的各类数据，包括机器人运行参数、设备状态等，利用这些数据构建制造过程的虚拟模型^[6]。此模型与实际生产过程形成实时映射，能够真实反映实际制造的动态变化。一方面，实现设备状态可视化，操作人员可直观了解设备的运行状况，及时发现潜在问

题；另一方面，借助虚拟调试功能，在虚拟环境中对多机器人协同作业流程进行调试与优化，提前规避实际生产中可能出现的碰撞、干涉等问题，提高生产效率与质量，保障汽车制造过程的高效、稳定运行。

(二) 实时数据交互机制

1. 异构设备通讯协议转换

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造时，异构设备通讯协议转换极为关键。研发支持工业以太网与现场总线的协议转换模块是实现这一转换的重要手段。由于汽车制造场景中，各类设备可能采用不同通讯协议，如工业以太网常用于高速数据传输，而现场总线在底层设备控制中广泛应用，协议转换模块要能精准识别并转换不同协议数据^[7]。通过该模块，可将基于工业以太网传输的数据，按照现场总线协议要求重新封装，反之亦然，以此确保不同协议设备间数据的顺畅交互。同时，需保障500ms级数据同步时效，这要求模块具备高效处理能力，快速完成协议转换，减少数据传输与处理延迟，为多机器人协同作业系统的实时数据交互奠定基础，提升汽车制造过程中设备协同的准确性与高效性。

2. 边缘计算节点部署

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，边缘计算节点部署至关重要。汽车制造车间环境复杂且数据量庞大，需在车间关键位置合理部署边缘计算节点。这些节点靠近数据源，可实时采集多机器人作业数据，如机器人运行状态、操作精度等，以及汽车制造工艺参数等数据。通过在边缘计算节点进行数据的初步处理和分析，过滤掉大量冗余数据，将关键有效数据传输至云端，实现工艺数据本地化处理与云端协同^[8]。如此不仅能降低网络传输压力，还能提高数据处理的实时性，保障多机器人协同作业的高效与精准，助力数字孪生系统更准确地模拟和优化汽车制造过程。

四、智能制造实施成效分析

(一) 设备管理数字化提升

1. 预测性维护体系建设

在汽车制造的多机器人协同作业系统中，预测性维护体系建设依托应用深度学习的设备健康度评估模型取得显著成效。通过该模型，能够精准洞察关键部件的运行状况，实现关键部件剩余寿命预测准确率≥92%。这一高准确率使得维护人员可提前规划维护工作，避免因关键部件意外故障导致生产线中断，大幅减少了计划外停机时间，有效保障了多机器人协同作业的连续性与稳定性。同时，基于精准的预测，企业能够更合理地安排维护资源，降低不必要的维护成本，提高设备使用效率，从整体上提升汽车制造过程中设备管理的数字化水平，为多机器人协同作业系统在汽车制造领域的高效运行奠定坚实基础^[9]。

2. 能效监控优化方案

通过构建基于数字孪生的能耗仿真系统，多机器人协同作业系统在汽车制造的能效监控优化方面取得显著成效。该系统能够

对生产线的能耗情况进行精准模拟与分析，为节能改造提供有力指导。在实际应用中，借助该系统深入剖析各生产环节的能源消耗状况，挖掘潜在的节能空间，进而有针对性地实施节能改造措施。最终成功实现能耗降低18%，不仅大幅减少了能源浪费，降低了生产成本，还提升了企业的能源利用效率和可持续发展能力^[10]。这一能效监控优化方案，不仅体现了数字孪生技术在汽车制造能耗管理中的重要作用，也为行业内其他企业提供了极具价值的参考范例，推动汽车制造行业朝着绿色、高效的方向发展。

（二）生产数字化平台建设

1. MES系统深度集成

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的过程中，MES系统深度集成于生产数字化平台建设，成效显著。通过将MES系统与多机器人协同作业系统深度融合，实现了数据的无缝流通。一方面，MES系统能实时获取多机器人的运行参数、任务进度等详细信息，为生产计划的精准调整提供依据。另一方面，多机器人依据MES系统传递的生产指令，灵活且高效地执行任务，极大提升了生产效率。例如，在汽车零部件装配环节，MES系统根据订单需求和库存状况，精准调度多机器人协同作业，使装配时间大幅缩短，装配精度显著提高，产品质量得到有力保障。而且，这种深度集成实现了生产过程的透明化管理，便于管理人员及时发现并解决潜在问题，优化生产流程，增强汽车制造企业的市场竞争力。

2. 质量追溯系统构建

在汽车制造中，通过建立覆盖全工艺链的电子履历系统，质量追溯系统构建取得显著成效。该系统详细记录汽车生产过程中每个环节的信息，从零部件的采购、装配到整车下线，所有数据都被精准录入，确保缺陷件可追溯率达100%。这意味着一旦出现质量问题，能够迅速定位问题源头，无论是某个零部件的生产批次，还是具体的装配工位，都能准确查明。不仅有助于快速解决当下的质量问题，还能为后续生产工艺的优化提供关键数据支撑，极大提升了产品质量的可控性，有效减少了因质量问题导致的成本增加和品牌声誉损失，为汽车制造的高质量发展奠定坚实基础。

（三）实际应用效果验证

1. 某主机厂实施案例

在某主机厂的实际应用中，多机器人协同作业系统展现出显

著成效。该主机厂引入此系统于其柔性生产线后，通过实证数据可直观看到系统带来的积极改变。其中，设备综合效率（OEE）提升了26%，这意味着生产线设备的整体性能得到大幅优化，有效工作时间占比增加，故障停机、生产调整等损失时间减少。同时，换型时间缩短了40%，极大地提升了生产线对不同车型生产切换的灵活性与速度，减少了因换型造成的生产停滞，提高了生产效率。这些实证数据有力验证了多机器人协同作业系统在汽车制造中的卓越应用效果，为汽车主机厂提升智能制造水平提供了可靠的技术支撑。

2. 行业推广应用价值

多机器人协同作业系统在实际应用中，高度适配新能源汽车产线快速重构需求。该系统显著提升了新能源汽车生产的灵活性与效率，能够依据不同车型和生产需求，快速实现机器人作业任务的重新分配与布局，确保产线在复杂多变的市场环境下高效运转。从行业推广应用价值来看，其模块化设计为汽车制造行业提供了通用且便捷的推广策略。通过模块化推广，不同规模和生产类型的汽车制造企业，可按需选取适合的模块进行集成，有效降低新技术引入成本与风险。这不仅有利于推动整个汽车制造行业向智能制造转型，还能促使各企业在激烈竞争中灵活应对市场变化，提升行业整体竞争力。

五、总结

多机器人协同作业系统已成为汽车制造迈向智能化、高效化的关键支撑。在汽车智能制造进程中，该系统实施要点的凝练，为实际应用提供了重要指引。5G-MEC融合技术有望进一步优化多机器人间的通信与协作效率，群体智能算法则能提升机器人协作的自主性与智能性，为系统的发展带来新的契机，这些都是极具潜力的未来研究方向。此外，建立行业标准体系意义重大，它能规范多机器人协同作业系统在汽车制造中的应用，确保不同厂商的设备与技术能够兼容与协同，提升整体产业的竞争力。未来应持续聚焦这些关键领域，推动多机器人协同作业系统在汽车制造中发挥更大效能，助力汽车产业向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 黄瑞.支持端边云协同的PLC编程环境开发的关键技术研究 [D].华中科技大学, 2022.
- [2] 何天英.高性能金属构件多电弧协同增材制造关键技术研究 [D].华中科技大学, 2022.
- [3] 陈启鹏.面向数字孪生的自动化产线制造过程状态监测关键技术研究 [D].贵州大学, 2021.
- [4] 胡世杰.基于数字孪生和深度强化学习的虚拟超声机器人关键技术研究 [D].南昌大学, 2023.
- [5] 鲁济帅.多弹协同攻击策略关键技术研究 [D].西安工业大学, 2023.
- [6] 熊继芬, 彭朝晖, 倪炳林.基于数字孪生技术的汽车智能制造实训基地建设探索 [J].装备制造技术, 2022, (12): 168-171.
- [7] 姜德涛.智能机器人数控技术在汽车制造中的应用研究 [J].内燃机与配件, 2021, (18): 206-207.
- [8] 宋娟.汽车制造中的铝合金焊接技术研究 [J].内燃机与配件, 2022, (05): 94-96.
- [9] 刘保瑞.工业机器人在汽车制造领域的应用分析 [J].汽车维修技师, 2024, (14): 127-128.
- [10] 梅荣娣.机器人在汽车制造领域中的应用分析 [J].时代汽车, 2022, (07): 33-34.