

工业机器人与数控机床协同控制策略研究

李雨阳 刘昊丰

北京工业大学耿丹学院 北京 101301

摘要：随着智能制造技术的发展，机器人与数控机床的协同作业逐渐成为提升制造效率与柔性的重要路径。传统的机器人与数控设备多为各自独立运行，缺乏高效的通信与控制机制，难以满足复杂工艺流程对自动化程度和响应速度的高要求。本文围绕机器人与数控机床的协同控制策略进行系统研究，分析当前主流协同方式，探讨其面临的关键技术问题，如系统集成、通信协议、同步控制等。通过构建统一的控制架构与协调机制，实现对加工任务的工艺级协同与设备级联动，从而提升系统的响应能力、稳定性和加工精度。

关键词：工业机器人；数控机床；协同控制；系统集成；智能制造

在工业4.0和“中国制造2025”战略背景下，制造业正朝着智能化、柔性化和高效化方向快速发展。工业机器人凭借其高柔性与重复作业能力，广泛应用于装配、搬运、上下料等环节；数控机床则以其高精度、高稳定性成为复杂加工的主要设备。然而，在实际生产中，机器人与数控机床通常处于相对独立的状态，缺乏统一的控制平台与协同机制，导致信息孤岛、重复操作、效率低下等问题。为实现真正意义上的智能制造，亟需研究并建立机器人与数控机床之间的协同控制策略，使其在空间位置、时间节点、控制逻辑等方面实现同步协作。

一、机器人与数控机床协同控制的应用背景与发展趋势

（一）智能制造对设备协同控制的需求分析

随着智能制造向深度融合阶段推进，单一设备的独立运行已难以满足复杂制造场景的高效生产需求，机器人与数控机床的协同控制成为必然趋势。智能制造的核心诉求在于实现“柔性化、自动化、智能化”生产，而二者协同可充分发挥机器人的灵活搬运、装配能力与数控机床的高精度加工优势，形成“加工—搬运—检测”一体化作业流程。

（二）国内外协同控制技术发展现状对比

国内外在机器人与数控机床协同控制技术发展上呈现出“技术方向趋同、应用深度有别”的特点。国外技术起步较早，在核心算法、硬件设备与系统集成方面具有先发优势：例如德国、日本等制造业强国，已形成成熟的协同控制解决方案，依托高精度传感器、工业

以太网技术，实现设备间毫秒级通信与时序同步，且在汽车、航空航天等高端制造领域广泛应用，系统稳定性与可靠性经过长期实践验证。国内技术近年来发展迅速，在政策扶持与市场需求驱动下，本土企业在协同控制软件开发、本地化服务方面取得突破，部分解决方案已在3C电子、工程机械等领域落地应用。

（三）协同系统在典型制造场景中的应用案例

机器人与数控机床协同系统已在多个典型制造场景中展现出显著应用价值，覆盖不同行业的核心生产环节。在汽车制造领域，发动机缸体加工线采用协同控制：机器人通过视觉定位抓取缸体毛坯，按预设路径输送至数控机床进行铣削、钻孔加工，加工过程中机器人实时监测机床运行状态，待加工完成后立即将工件转移至检测工位，同时补充新毛坯，实现“加工—输送—检测”连续作业，大幅缩短工序间隔，提升生产线节拍效率。在航空航天零部件制造中，针对大型复杂构件，需多台机器人与多台数控机床协同：部分机器人负责工件翻转、定位，辅助数控机床完成多角度加工，另一部分机器人负责工具更换、废料清理，确保加工过程不中断，同时通过协同控制保证多设备动作的精准配合，避免碰撞或加工误差，满足航空航天产品对高精度的严苛要求。

二、机器人与数控机床协同控制的关键技术问题

（一）多设备通信与数据交换协议设计

多设备通信与数据交换是机器人与数控机床协同控制的基础，其核心挑战在于实现“高速、稳定、兼容”的数据传输与信息共享。不同设备往往来自不同厂商，采用的通信协议存在差异，若协议不兼容，会导致

数据传输中断或延迟，影响协同效果。因此，协议设计需优先解决兼容性问题：一方面可采用开放式工业以太网协议，其支持多主站通信与实时数据传输，且兼容多数主流设备；另一方面可开发协议转换网关，实现不同协议间的数据格式转换，确保设备间“能通信、能理解”。

（二）时序同步与任务调度策略研究

时序同步与任务调度是确保工业机器人与数控机床协同动作精准配合的核心技术，直接影响协同作业的精度与效率。时序同步的关键在于消除设备间的时间偏差：由于机器人与数控机床的控制系统独立运行，时钟基准不同步会导致动作延迟或提前，例如数控机床按预设时间启动加工，而机器人送料延迟，会造成机床空转；反之则可能导致工件未到位即开始加工，引发设备碰撞。因此，需建立统一的时间基准，通过工业以太网的时间同步协议实现设备时钟校准，将时间偏差控制在允许范围内。同时，需实时监测设备动作状态，通过反馈信号动态调整动作时序，例如当机器人送料速度因负载变化减缓时，系统自动延迟数控机床的加工启动时间，确保二者衔接顺畅。任务调度策略则需应对“多任务、动态负载”的生产场景：在多设备协同作业中，需根据生产计划、设备状态合理分配任务，例如当某台数控机床出现故障时，调度系统需快速将其任务转移至其他空闲机床，并调整机器人的输送路径，避免生产中断。调度策略还需兼顾效率与资源利用率，通过算法优化任务执行顺序，减少设备等待时间，例如采用“先急后缓”的优先级调度，优先处理紧急订单任务；采用“负载均衡”调度，避免部分设备过度繁忙而其他设备闲置，实现协同系统整体效能最大化。

（三）空间轨迹规划与碰撞检测机制

空间轨迹规划与碰撞检测是保障工业机器人与数控机床协同作业安全、精准的关键环节。空间轨迹规划需同时满足“精度要求”与“效率要求”：机器人在抓取、输送工件过程中，需规划最优运动轨迹，确保工件能精准定位至数控机床的加工位置，避免因轨迹偏差导致加工误差；同时，轨迹需尽量缩短路径长度、减少运动拐点，降低机器人能耗与运动时间，提升作业效率。因此，需建立实时碰撞检测系统：一方面通过三维建模构建设备、工件、工装的虚拟模型，在运动前进行离线轨迹仿真，提前排查碰撞风险；另一方面在实际运行中，利用安装在设备上的传感器实时采集位置信息，若检测到设备间距小于安全阈值，立即触发紧急停机或调整动作指

令，避免碰撞发生。

三、协同控制系统架构与实现方法研究

（一）基于PLC和工业总线的集中式控制平台设计

基于PLC和工业总线的集中式控制平台，是工业机器人与数控机床协同控制的经典架构，核心特点在于“集中决策、统一控制”。该架构以PLC作为控制核心，通过工业总线连接机器人、数控机床、传感器等所有设备，形成“中央控制—终端执行”的层级结构。PLC负责接收上位机下发的生产计划，解析后生成详细的控制指令，再通过工业总线同步发送至各设备，协调机器人的搬运动作与数控机床的加工动作。

（二）分布式控制系统中的信息共享与协同机制

分布式控制系统打破了集中式架构的“单一控制核心”模式，将控制功能分散到各设备的本地控制器中，通过信息共享与协同机制实现全局优化，更适应复杂、大规模的协同制造场景。在该架构中，机器人控制器、数控机床控制器与上位机形成分布式网络，各控制器可独立完成本地任务，同时通过工业以太网实时共享设备状态、生产数据。信息共享需依托统一的数据模型，将不同设备的信息标准化，确保各控制器能准确解析与利用数据，例如机器人控制器将工件抓取位置信息共享给机床控制器，机床控制器据此调整加工坐标系，保证加工精度。协同机制则通过“协商决策”实现全局最优：当生产需求变化或设备状态异常时，各控制器通过预设算法进行信息交互与任务分配，无需依赖中央控制器。

（三）基于数字孪生的虚实同步与动态调整方法

基于数字孪生的协同控制方法，通过构建物理系统的虚拟映射，实现“虚实同步、动态优化”，为工业机器人与数控机床协同控制提供智能化支撑。该方法的核心是建立高精度的数字孪生模型，涵盖机器人、数控机床、工件、工装夹具等所有物理实体，模型不仅还原实体的几何形状，还能实时映射其运行状态。虚实同步通过实时数据传输实现：物理设备上的传感器采集状态数据，通过工业互联网传输至数字孪生平台，平台根据数据更新虚拟模型的状态，确保虚拟系统与物理系统完全一致。在协同作业前，可在数字孪生平台中模拟不同的生产方案，优化设备动作时序、轨迹规划与任务调度策略，避免物理试验中的资源浪费与风险；在作业过程中，平台通过分析虚拟模型的运行数据，预测可能出现的问题，提前发出预警并生成调整方案，例如预测到机器人输送速度过快可能导致工件晃动，自动优化其运动参数，

降低速度并调整加速度。

四、协同控制策略优化与性能验证

(一) 控制策略对系统响应时间与稳定性的影响

控制策略是决定工业机器人与数控机床协同系统响应时间与稳定性的核心因素，不同策略的设计逻辑直接影响设备协同的效率与可靠性。系统响应时间指从“接收指令”到“设备完成动作”的时间间隔，其长短与控制策略中的通信机制、任务调度算法密切相关。例如，采用“优先级通信策略”，将加工指令、位置信号等关键数据设为高优先级，可减少数据传输延迟，加快系统响应速度；而若采用“公平调度策略”，对所有数据平均分配通信资源，可能导致关键指令传输延迟，延长系统响应时间，影响工序衔接效率。在系统稳定性方面，控制策略的容错机制与动态调整能力至关重要：当某一设备出现短暂故障，若控制策略具备“故障自诊断与补偿”功能，可通过其他设备的冗余数据临时替代，维持系统运行；反之，若策略缺乏容错设计，设备故障可能引发整个协同系统停机。

(二) 协同作业效率评估与控制参数优化

协同作业效率评估是衡量工业机器人与数控机床协同系统性能的重要手段，而控制参数优化则是提升效率的关键路径。效率评估需建立多维度指标体系，不仅包括“生产效率”指标，还需兼顾“质量效率”与“能耗效率”。例如，在汽车零部件生产协同系统中，若仅追求单位时间加工数量，可能导致机器人送料速度过快，增加工件碰撞风险，降低产品合格率，反而影响整体效率。因此，评估需综合分析各指标，找出效率瓶颈。控制参数优化需针对评估中发现的瓶颈，调整影响协同作业的关键参数：例如，若评估发现“设备等待时间过长”是效率瓶颈，可优化任务调度参数；若“加工精度偏差”导致合格率低，可优化轨迹规划参数；若“能耗过高”，可优化设备运行参数。参数优化需采用“仿真测试—现场验证”的循环模式：先在数字孪生平台中模拟不同参数组合的运行效果，筛选出最优参数方案，再在物理系统中进行小批量试验，根据实际运行数据微调参数，确保优化后的参数既能提升协同作业效率，又能保障系统稳定与产品质量。

(三) 实验平台搭建与典型工况验证分析

实验平台搭建是工业机器人与数控机床协同控制技术从理论研究走向实际应用的关键环节，而典型工况验

证分析则是检验技术可行性与可靠性的必要步骤。实验平台搭建需模拟真实制造场景，配置与实际生产匹配的硬件设备与软件系统。平台设计需注重“可扩展性”，支持增减设备或更换不同品牌型号的设备，以适应不同典型工况的验证需求；同时需具备“数据采集与分析”功能，实时记录设备运行参数、加工数据与系统状态，为后续验证分析提供依据。典型工况验证需覆盖协同系统可能面临的主要运行场景，包括“正常工况”、“动态工况”与“故障工况”。

结语

工业机器人与数控机床的协同控制是构建智能化生产系统的关键环节。通过系统集成与协同控制策略的优化，不仅能提升设备间的协作效率，还能增强生产柔性、降低能耗与人工成本。未来应加强对工业现场多源数据的融合感知、控制算法的自适应性提升，以及与5G、边缘计算等新兴技术的深度融合，加速协同制造系统的智能化演进。

参考文献

- [1] 张伟, 李建国. 工业机器人与数控机床协同控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2022(10): 112-117.
- [2] 刘强, 王志刚. 面向智能制造的机器人与数控设备集成控制技术[J]. 电气自动化, 2023(4): 56-60.
- [3] 赵磊, 陈立军. 基于PLC的机器人与机床协同作业控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2021(6): 89-93.
- [4] 王欣, 唐浩. 工业机器人与加工中心协同控制中的关键技术分析[J]. 机械管理开发, 2023(3): 74-78.
- [5] 冯涛, 李晓峰. 多智能体系统在机器人与数控机床协同控制中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(9): 41-45.
- [6] 周杰, 杜文斌. 基于OPCUA的异构设备协同控制研究[J]. 计算机与应用化学, 2021(8): 102-107.
- [7] 刘洋, 吴俊. 工业机器人与数控机床空间协同路径规划研究[J]. 机械设计与研究, 2022(7): 64-69.
- [8] 韩磊, 宋伟. 基于数字孪生的机器人协同制造系统研究[J]. 智能系统学报, 2023(1): 15-20.
- [9] 陈超, 张志远. 面向智能生产线的机器人与数控设备协同控制技术探讨[J]. 中国机械工程, 2022(18): 2134-2139.