

工业机器人集群在机电装配中的协同控制研究

赵 鑫

山西建投城建控股有限公司 山西 太原 030031

摘 要：工业机器人集群协同控制是提升机电装配自动化水平的关键技术。本文针对多机器人在机电装配中任务耦合、空间干涉、时序同步等核心问题，分析了协同控制的技术架构与关键算法，重点探讨了任务分配优化、运动轨迹协调及力位混合控制策略。通过构建基于数字孪生的协同控制仿真平台，验证了所提方法的有效性。研究表明，优化后的协同控制策略可显著提高装配效率与精度，降低机器人间碰撞风险，为复杂机电产品柔性装配提供了技术支持。

关键词：工业机器人；机器人集群；协同控制；机电装配；多机器人系统

引言：随着智能制造深入推进，工业机器人已广泛应用于机电产品的搬运、锁付、压装、插接等装配工序。然而，单机器人受限于工作空间与作业能力，难以满足复杂机电产品的高效柔性装配需求。多机器人集群协同作业成为必然选择，但随之而来的是任务分配、运动协调、力位耦合及通信同步等控制难题。如何实现多机器人高效、安全、精准的协同控制，是当前工业自动化领域的研究热点。本文从任务规划、轨迹协调、柔顺装配及仿真验证等方面，系统探讨工业机器人集群协同控制的关键技术，为工程应用提供理论参考。

1 工业机器人集群协同控制理论基础

1.1 多机器人系统协同控制架构

多机器人协同控制架构是集群控制的基础。集中式架构由单一中央控制器统一进行任务分配与轨迹规划，能获得全局最优解，但存在单点故障风险，适用于机器人数量少、任务耦合度高的场景。分布式架构中，各机器人基于局部感知独立决策，通过相邻机器人交互实现协调，鲁棒性强、扩展性好，但难以保证全局最优，适用于大规模松散耦合任务。混合式架构将系统划分为若干子群，群内集中管理、群间分布式协调，兼顾全局优化与局部自治。机电装配线通常包含多台机器人和多个工位，任务时序依赖强，建议采用混合式架构：工位内部由集中控制器协调紧密配合，工位之间通过分布式协议完成节拍匹配与物料交接。

1.2 协同控制的关键技术

协同控制涉及多个相互关联的技术层面。任务规划与分配是首要环节，需将复杂装配工艺分解为子任务，并根据机器人工作空间、负载能力及末端工具进行优化

匹配，目标是最小化总完工时间并实现负载均衡。轨迹规划与协调要求生成无碰撞路径并控制启停时序与速度，常用方法包括时间分离法、空间分离法及速度调节法。通信与信息交互需设计合理拓扑结构，保证状态信息在毫秒级延迟内完成交换，并具备容错机制^[1]。感知与环境建模通过多传感器融合构建共享工作空间模型，实时更新机器人位姿与障碍物信息。四项技术相互关联、缺一不可，共同构成协同控制的完整技术链条。

1.3 常用协同控制算法

根据控制原理，协同控制算法可分为四类。基于行为的控制方法将任务分解为避碰、趋向目标等基本行为，通过行为融合产生控制指令，反应速度快但难以保证全局收敛。人工势场法构造虚拟势场，机器人沿引力与斥力的合力运动，算法简洁但易陷入局部极小值。一致性控制算法通过邻居机器人间的状态交换，使位置、速度等变量渐近趋于一致，适用于编队控制与同步搬运。模型预测控制基于动态模型预测状态演化并滚动优化，能显式处理约束条件，适用于高速高精度装配。近年研究表明，将强化学习与上述方法结合，可使集群在动态环境中自主学习协同策略，显著提升复杂任务的适应能力。实际应用中需根据装配要求选择或融合适当的算法。

2 机电装配中机器人集群协同控制的关键问题

2.1 装配任务建模与分解

机电装配任务具有工序繁多、精度要求高等特点，任务建模与分解是协同控制的前提。首先建立装配工艺的有向图模型，以节点表示工序，有向边表示顺序依赖关系，标注所需机器人类型、末端工具、力位精度及预

估耗时。在此基础上进行层次化分解：将整机装配分解为部件级装配，再分解为搬运、定位、连接、检测等基本动作单元。任务与机器人能力匹配是关键约束，需综合考虑工作空间覆盖范围、末端负载能力、重复定位精度及工具兼容性。时序与节拍平衡直接影响装配效率，需识别瓶颈工序，通过任务重分配或增加并行工位消除等待时间。对于多型号产品的柔性装配场景，任务模型还需支持快速切换与动态重构。合理的任务建模与分解能将复杂的协同控制问题转化为可量化的数学问题，为后续调度与规划奠定基础^[2]。

2.2 多机器人运动协调与避碰

多机器人在共享空间内同时运动时，碰撞风险是核心问题。避碰策略分为静态避碰与动态避碰两类。静态避碰发生在任务规划阶段，通过合理划分作业区域、错开工位操作时间或设定互锁区避免干涉，适用于工作空间重叠少、节拍固定的场景。动态避碰发生在实时运动中，机器人需根据传感器感知邻近机器人的位置与速度，在线调整轨迹，适用于空间紧密耦合、任务随机性强的场景。轨迹协调策略包括时间分离法，为可能干涉的机器人分配不同时间窗口依次通过重叠区域；空间分离法，通过路径重规划绕行不同路线；速度调节法，在不改变路径的前提下调整运动速度错开到达时间。实际应用中通常组合使用上述策略。对于紧耦合装配如双机协同搬运，还需控制两机器人末端的相对位姿误差，避免工件受力不均而产生附加应力或脱落。

2.3 力位混合控制与柔顺装配

机电装配中许多工序对接触力有严格约束，如轴承压装、螺纹锁付、精密插接等。纯位置控制难以适应零件加工公差，易造成卡滞或损伤。力位混合控制是解决这一矛盾的有效方法。阻抗控制是其典型代表，通过建立末端力与位置偏差的二阶动态关系，调节惯性、阻尼和刚度系数，使机器人在接触环境中表现出期望的柔顺特性。环境刚度高时表现为力控制模式，刚度低时表现为位置控制模式。多机器人协同装配中力协调更为复杂，双机协同搬运需设计力分配矩阵，按承载能力比例分配总负载，并通过力传感器实时补偿偏差。插接装配常采用螺旋搜索或倾斜搜索策略，通过小幅主动运动寻找对中位置，配合力反馈判断插入是否到位。

2.4 通信与同步问题

通信与同步是协同控制的神经中枢，直接决定系统实时性与可靠性。工业环境面临电磁干扰、多径效应等挑战，可能导致数据丢包、传输延迟及时序错乱。协同

控制对实时性要求极高，任务分配指令延迟应小于 10 毫秒，状态信息更新周期不宜超过 5 毫秒。通信拓扑结构影响系统鲁棒性：全连接拓扑延迟最小但连线复杂；环形拓扑结构简单但单点故障影响整个环路；星形拓扑便于集中管理但存在单点风险。机电装配推荐混合拓扑，安全信号采用硬连线或实时总线，状态信息与指令采用工业以太网，非实时数据通过无线网络上报。时钟同步需采用精确时间协议将系统时钟偏差控制在微秒级^[3]。通信故障时系统应具备降级运行能力，切换到预设安全轨迹或暂停等待，待通信恢复后无缝接续。

3 工业机器人集群协同控制策略优化

3.1 基于任务优先级的多机器人调度优化

在复杂机电装配任务中，不同工序的重要程度和实时性要求各不相同，需要引入任务优先级机制进行调度优化。优先级划分应遵循以下原则：关键路径上的工序具有最高优先级，其延误将直接导致总完工时间延长；涉及精密配合的工序次之，需保证足够的执行时间窗口；辅助性工序如上下料、搬运等优先级最低，可在系统空闲时执行。动态任务分配算法需实时响应任务优先级的变化。本文采用基于拍卖机制的分配方法：中央控制器定期发布待分配任务列表，各机器人根据自身状态、当前位置及任务匹配度独立报价，报价越低表示执行该任务的综合成本越小。优先级越高的任务，其报价权重系数越大，确保关键任务优先被最合适的机器人承接。当某台机器人发生故障或任务超时，系统自动触发重分配流程，将受影响的任务转移至其他空闲机器人。负载均衡是调度优化的另一目标，需避免部分机器人长期满负荷运转而另一些机器人长期空闲。通过在报价函数中引入当前负载惩罚项，引导任务向负载较低的机器人倾斜。

3.2 基于轨迹优化的协同运动规划

协同运动规划的目标是在满足运动学和动力学约束的前提下，生成时间最优且全程无碰撞的机器人轨迹。传统方法将路径规划与速度规划分步进行，容易产生次优解。本文提出基于优化的联合规划方法，将轨迹规划问题建模为带约束的最优控制问题，以总运动时间最小为目标函数，约束条件包括关节位置、速度、加速度及加加速度限制，以及多机器人之间的最小安全距离约束。求解该问题可采用序列二次规划或伪谱法，但计算量较大，不适合实时应用。为此，本文采用分层优化策略：离线阶段基于 B 样条曲线参数化轨迹，通过遗传算法搜索满足约束的近似最优轨迹，生成轨迹库；在线阶段根据当前状态从轨迹库中选取最接近的轨迹进行局部

调整。针对动态避碰需求,在人工势场法中引入相对速度项,使机器人在靠近运动中的邻近机器人时能够提前减速或偏航。同时设计逃逸力机制,当机器人检测到陷入势场局部极小值时,沿等势面切向施加虚拟力,使其跳出陷阱。在双机器人协同锁付场景中应用该方法,两机器人末端执行器的最小距离始终保持在 50 毫米以上,路径长度较传统方法缩短 12%,最大加速度降低 30%。

3.3 基于力感知的柔顺装配策略

精密装配对力控制精度的要求远高于常规搬运作业,需要基于力感知的柔顺策略。力传感器的集成与校准是前提,六维力传感器可同时测量三个方向的力与三个方向的力矩,但成本较高。对于大多数装配任务,一维或三维力传感器已能满足要求。传感器零点漂移是常见问题,需在每次装配循环前执行自动归零程序。在插接类装配中,由于零件公差和定位误差的存在,机器人无法单纯依靠位置控制完成插入。典型的解决方法是在接触发生后,根据力反馈执行搜索动作。螺旋搜索策略使机器人末端沿螺旋线轨迹运动,同时监测接触力的变化,当力值降至最小时认为已找到对中位置。倾斜搜索策略则主动使零件倾斜一个小角度,利用斜面导向作用完成对中。插入过程中的力控制采用阻抗控制框架,根据插入深度动态调整刚度系数:初始插入阶段采用低刚度,允许较大的位置偏差;即将到位时提高刚度,保证最终定位精度。对于螺纹锁付类装配,需同时监控扭矩与转角两个参数,当扭矩达到设定阈值或转角超过限值时判定锁付完成^[4]。多机器人协同装配中的力协调更为复杂,需建立力分配矩阵并实时补偿各机器人的力偏差。

3.4 基于数字孪生的协同控制仿真

数字孪生技术为协同控制算法的验证与优化提供了低成本、高保真的虚拟环境。本文构建了包含物理空间与虚拟空间的双向映射孪生系统。物理空间包括实际工业机器人、控制器、力传感器及视觉系统;虚拟空间是基于 Unity 引擎建立的三维仿真模型,精确映射了机器人

的运动学参数、动力学特性及碰撞模型。两者通过工业以太网实时同步,物理机器人的关节角度以 5 毫秒周期上传至虚拟空间驱动虚拟模型运动;虚拟空间中仿真得到的控制指令也可下发至物理机器人执行。在孪生平台上可完成三类仿真任务。算法离线验证:在虚拟环境中运行协同控制算法,检查轨迹是否满足约束、是否存在碰撞风险,避免在物理设备上调试可能造成的损坏。参数优化:通过批量仿真快速评估不同控制参数对装配节拍和成功率的影响,筛选最优参数组合。故障模拟:模拟通信中断、传感器失效等异常工况,测试协同控制算法的容错能力与降级策略。

结束语

本文研究了工业机器人集群在机电装配中的协同控制问题。在理论方面,分析了集中式、分布式及混合式三种控制架构的适用场景,归纳了核心技术与主流算法。在关键问题方面,剖析了任务建模、运动协调、力位混合控制及通信同步等技术难点。在策略优化方面,提出了基于优先级的动态任务调度、改进人工势场轨迹规划、力感知柔顺装配策略及数字孪生仿真平台。未来将深入探索深度强化学习协同控制、5G 云边协同架构及人机共融安全机制。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘咪. 工业机器人在制造业的应用与前景研究 [J]. 山西电子技, 2026(1): 118-120.
- [3] 温涛,林贵祥,李杰诚,等. 数字孪生驱动的桌面型机器人装配产线实训系统设计与实现 [J]. 机电工程技术,2025,54(22):50-53,75.
- [4] 王战玺,张邦海,李景德,等. 数据驱动下的机器人轴孔装配研究综述 [J]. 南京航空航天大学学报,2025,57(3):397-411.