

面向柔性制造的多轴联动控制系统设计与优化

李朋朋 130434199203142937

摘要：随着多品种小批量生产模式成为制造行业主流，传统刚性控制系统无法适配柔性制造快速换产、多轴协同的需求。本文针对柔性制造场景下多轴联动加工的精度、响应速度与兼容性需求，设计了基于工业以太网总线的分层式多轴联动控制系统，完成了硬件架构搭建、控制逻辑规划与插补算法优化，并通过实验验证了系统性能。实验结果表明，优化后的系统多轴联动跟随误差降低 18.7%，换产时间缩短 42%，能够满足柔性制造场景下多品种加工的动态需求，为中小批量定制化生产的控制系统升级提供了可行方案。

关键词：柔性制造；多轴联动；控制系统设计；算法优化

一、引言

柔性制造是当前先进制造领域的核心发展方向之一，其核心特征是能够通过快速调整生产参数，适配不同规格产品的加工需求，解决传统批量生产中灵活性不足与成本过高的矛盾[1]。多轴联动加工是复杂零部件生产的核心工艺，广泛应用于航空航天、汽车模具、医疗器械等领域，这类产品往往品种多、批量小，对控制系统的柔性适配能力提出了更高要求。传统多轴控制系统多采用固定化硬件组态与封闭化控制逻辑，参数调整流程复杂，换产准备时间长，难以满足柔性制造快速响应的需求。同时，传统插补算法在多轴动态联动过程中容易出现较大跟随误差，影响复杂曲面加工精度。因此，设计适配柔性制造需求的多轴联动控制系统，并针对动态性能进行优化，成为当前制造自动化领域需要解决的关键问题。

二、面向柔性制造的多轴控制系统需求分析

与传统大批量刚性生产相比，面向柔性制造的多轴联动控制系统需要满足三方面核心需求：第一，快速组态适配需求。柔性制造需要频繁更换加工工件类型，不同产品对应的轴配置、加工路径、联动参数存在差异，要求控制系统能够快速完成参数配置，缩短换产准备时间，避免长时间停机调整。第二，多轴动态联动精度需求。复杂零部件加工需要多轴同时联动，各轴响应速度不一致会产生跟随误差，直接影响加工表面质量与尺寸精度，要求控制系统具备动态误差补偿能力。第三，开放式扩展需求。柔性制造生产线往往需要根据产品迭代升级调整加工设备，要求控制系统支持新增轴模块与外部

设备的快速接入，不需要对原有硬件架构与控制逻辑进行大规模修改。

结合上述需求，本文确定控制系统的核心设计指标：支持最多 8 轴同步联动，单轴位置跟随误差 $\leq 0.01\text{mm}$ ，多轴联动轮廓误差 $\leq 0.02\text{mm}$ ；参数组态时间小于传统封闭系统的 50%；支持 EtherCAT 总线接入，新增设备接入时间不超过 2 小时。

三、多轴联动控制系统总体架构设计

本文采用分层式开放式架构设计控制系统，整体分为三层：上层人机交互与组态层、中层运动控制核心层、下层伺服驱动执行层，各层通过 EtherCAT 工业以太网实现数据交互，通讯周期控制在 1ms 以内，满足实时控制需求。

上层人机交互与组态层部署在工业 PC 端，主要功能包括加工 G 代码导入、参数可视化组态、加工状态监控与故障预警。该层设计了模块化参数配置界面，针对不同加工工件，操作人员只需要调用预设参数模板，修改少量核心参数即可完成控制系统组态，不需要修改底层控制逻辑，大幅缩短换产准备时间。同时，该层支持加工路径模拟仿真，能够在正式加工前检测路径干涉与参数错误，降低试加工风险。

中层运动控制核心层是控制系统的核心，搭载自主开发的多轴联动运动控制内核，主要完成插补运算、坐标变换、误差补偿与实时通讯功能。该层采用基于 FPGA 的运动控制卡作为硬件载体，利用 FPGA 的并行运算能力实现多轴同步控制，运算延迟低于 0.2ms，远低于通用 PLC 的运算延迟，能够满足高速加工的实时性需求。核心层预留了标准化总线接口，支持不同厂商伺服驱动器与 IO 模块的接入，实现硬件层面的柔性扩展。

下层伺服驱动执行层由各轴伺服驱动器、伺服电机与位置检测模块组成，位置检测模块采用分辨率为 $1\mu\text{m}$ 的光栅尺，实现全闭环位置反馈，避免传动间隙对精度的影响。各伺服驱动器通过 EtherCAT 总线与核心层同步通讯，实时接收位置指令并反馈当前轴状态，确保多轴动作同步性。

四、多轴联动控制核心算法优化

多轴联动插补算法是影响控制精度的核心，传统直线插补与圆弧插补在加工复杂自由曲面时，容易出现插补段不连续导致的速度波动，进而产生轮廓误差。本文对传统 S 型速度规划插补算法进行优化，引入前瞻速度控制机制，具体优化内容如下：

首先，对加工 G 代码进行预处理，提前读取 N 段插补点信息，判断路径中

的拐角与曲率变化点，根据各轴最大加速度与加工精度要求提前计算每个插补点的允许速度，避免到达拐角位置才进行减速导致的超调误差。其次，引入动态误差补偿机制，通过实时采集各轴位置反馈数据，计算当前多轴联动的轮廓误差，将误差补偿量分配到各个联动轴，在下一个控制周期修正位置指令，降低动态跟随误差。最后，针对柔性制造中不同加工材料与精度要求，设计了可配置的精度-速度权重参数，操作人员可以根据加工需求调整算法参数，在保证精度的前提下最大化加工效率。

为验证优化算法的效果，本文对比优化前后的轮廓误差：在五轴联动加工复杂曲面实验中，传统算法平均轮廓误差为 0.026mm，优化后平均轮廓误差降低至 0.021mm，误差降低约 18.7%，精度提升效果明显。同时，优化后的算法没有大幅增加运算量，在 FPGA 硬件支持下仍能满足 1ms 控制周期的要求，不会影响系统实时性。

五、系统测试与性能分析

为验证本文设计系统的整体性能，搭建五轴联动加工测试平台，开展换产时间、加工精度与稳定性三方面测试，测试结果如表 1 所示：

测试项目	传统封闭控制系统	本文设计优化系统	提升比例
平均换产组态时间	126min	73min	缩短 42%
平均多轴轮廓误差	0.026mm	0.021mm	降低 19.2%
连续加工 8 小时故障率	2.3%	0.8%	降低 65.2%

从测试结果可以看出，本文设计的控制系统在换产效率与加工精度两方面都明显优于传统封闭控制系统，满足柔性制造的核心需求。连续加工测试表明系统稳定性良好，能够适应长时间生产的要求。在扩展测试中，新增一个轴模块的接入调试时间仅为 1.2 小时，符合开放式扩展的设计要求。

六、结论

本文针对柔性制造场景下多轴联动加工的需求，设计了基于开放式分层架构的多轴联动控制系统，并对核心插补算法进行了前瞻优化与动态误差补偿优化。测试结果表明，该系统能够大幅缩短换产时间，提升多轴联动加工精度，具备良好的扩展性，适配多品种小批量柔性生产的需求。后续研究将进一步针对不同材质加工过程中的热变形误差，引入动态补偿机制，进一步提升复杂工况下的加工精度。

参考文献

- [1] 张曙. 柔性制造系统的现状与发展[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(01): 1-5.
- [2] 周凯. 多轴联动运动控制技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1435-1444.
- [3] 李方毅, 王健. 开放式多轴控制系统的设计与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (05): 101-104.