

PLC在激光增材制造 (SLM) 设备多轴运动协调控制中的应用与优化

李渊博 李绍行

洛阳盈创极光精密制造有限公司 河南 洛阳 471822

摘要: PLC在激光增材制造 (SLM) 设备多轴运动协调控制中的应用与优化, 是提升设备加工精度、稳定性及拓展应用场景的核心技术手段。本文阐述SLM设备多轴运动控制的核心需求及PLC应用基础, 分析传统控制模式存在的同步性不足、响应滞后、补偿缺失等问题, 从硬件架构、控制算法、补偿机制三个维度提出优化方案, 通过实验验证优化效果。研究旨在为SLM设备多轴运动控制提供系统性解决方案, 推动PLC技术在增材制造领域的深度应用, 助力高端零件制造质量与效率的双重提升。

关键词: PLC; 激光增材制造设备; 多轴运动协调控制; 应用; 优化策略

激光增材制造 (SLM) 技术凭借高能激光束逐层熔化金属粉末的独特工艺, 已成为航空航天发动机叶片、医疗植入体等高精度复杂零件的关键制造技术。其加工质量高度依赖多轴运动系统的协调控制水平, 激光扫描头的轨迹精度、工作台的升降同步性、送粉机构的速率匹配度, 直接决定零件的尺寸精度、致密度与力学性能。可编程逻辑控制器 (PLC) 以其高可靠性、强抗干扰能力及灵活的编程特性, 成为SLM设备多轴运动协调控制的主流核心控制器。在当前制造业对零件精度要求持续提高、生产效率要求不断攀升的背景下, 深入研究PLC在SLM设备多轴运动控制中的应用瓶颈与优化路径, 不仅能突破传统控制模式的性能局限, 更能为增材制造装备的国产化、智能化升级提供技术支撑, 对推动高端制造业高质量发展具有重要现实意义。

1 SLM 设备多轴运动控制需求及 PLC 应用基础

1.1 SLM设备多轴运动控制的核心需求

SLM设备多轴运动系统需满足三项关键控制需求, 这些需求构成PLC应用的核心目标与性能指标。同步性需求是保障层间质量的基础, 激光扫描结束信号发出后, 工作台需在极短时间内精准下降设定层厚, 送粉机构需同步完成新一层粉末的均匀铺设, 任何环节的时序偏差都可能导致层间搭接不良或粉末浪费, 在高强度材料加工中甚至会引发零件开裂。轨迹精度需求直接决定零件尺寸合格性, 激光扫描头在平面内的实际运动轨迹与预设模型的偏差需控制在极小范围内, 尤其在复杂曲面的拐角处, 轴间联动的平滑性直接影响熔池稳定性, 过度的轨迹波动会导致表面粗糙度超差^[1]。动态响应需求针对材料特性差异, 不同金属粉末的熔化温度、导热系数与

流动性存在显著差异, 系统需根据材料类型实时调整运动参数, 运动系统需在短时间内完成参数切换与执行响应, 否则会出现熔池过热导致的球化现象或未熔合缺陷。

1.2 PLC在SLM设备多轴控制中的应用架构

当前PLC在SLM设备多轴控制中形成“主控制器+伺服驱动+反馈元件+辅助模块”的标准化架构。PLC作为主控制器, 通过脉冲输出模块向各轴伺服电机发送位置与速度指令, 实现对激光扫描头、工作台、送粉机构的运动控制。光栅尺与旋转编码器作为位置反馈元件, 实时采集各轴实际位置信息并通过高速计数模块传回PLC, 构成闭环控制以修正位置偏差, 确保指令位置与实际位置的差值控制在允许范围内。轴间协调通过电子齿轮与凸轮功能实现, 例如设定相关轴的速度比例关系以保证扫描轨迹的直线度, 通过PLC内部凸轮曲线设定工作台升降与激光开关的联动逻辑, 确保激光开启时工作台已稳定在目标高度。控制逻辑通过结构化文本编程实现, 包含加减速控制、极限位置保护、异常状态处理等功能, 例如在检测到反馈信号丢失或伺服报警时, PLC立即触发急停指令并切断激光电源, 避免设备损坏或零件报废。

2 PLC 在 SLM 设备多轴控制中存在的 key 问题

2.1 轴间同步性调控精度不足

传统PLC控制方案在轴间同步性上存在累积误差与动态偏差问题, 采用电子齿轮同步时, 各轴运动的相位差会随运行时间逐渐增大。在连续加工多层的大型零件时, 工作台升降的总误差可能超过允许范围, 导致零件轴向尺寸超差。这一问题源于PLC的扫描周期特性, 传统PLC的程序执行周期较长, 轴间同步信号的更新频率受此限制, 无法实现微秒级实时调整, 当设备长时间运

行后,每个周期的微小偏差不断叠加,最终形成显著误差^[2]。PLC与伺服驱动器之间的脉冲传输易受电磁干扰,SLM设备存在激光电源强电磁辐射,可能导致脉冲丢失或延迟,进一步加剧轴间不同步现象,在金属零件多层堆积时,层间错位会导致内部气孔率升高,影响零件力学性能。

2.2 动态响应速度难以满足高要求

PLC的串行处理机制使其动态响应速度受限,无法满足高动态加工场景的需求。当同时处理多轴运动控制、激光功率调节、惰性气体流量控制、温度监测等任务时,运动指令的更新周期会延长,在加工薄壁与厚壁交替的复杂零件时,滞后的指令更新会导致过渡区域熔池尺寸波动,影响零件力学性能的一致性。PLC与上位机的数据交互也存在瓶颈,上位机生成的复杂轨迹数据通过以太网传输至PLC需要一定时间,在加工具有细密纹路的零件时,轨迹指令的延迟会导致实际扫描路径与理论路径出现偏差,使纹路间距误差超过允许范围,影响零件表面质量。此外,传统PLC的脉冲输出频率上限较低,难以驱动伺服电机实现高速精密运动,限制了SLM设备的加工效率提升,导致单件生产时间延长,无法满足批量生产需求。

2.3 缺乏智能精度补偿机制

SLM加工过程中的环境变化与工艺波动会导致运动误差,而传统PLC控制缺乏针对性的补偿机制。工作台在长时间加工后会因激光热辐射产生热变形,传统控制仅依据预设参数执行,无法根据实时温度数据修正位置,导致零件在高度方向出现累积误差,影响整体尺寸精度。激光扫描头的机械振动也会影响轨迹精度,例如在拐角处的离心力作用下,扫描点会出现偏移,PLC无法通过实时振动监测数据调整运动指令,只能依赖机械结构的刚性来减少振动影响,导致轨迹偏差增大,无法满足高精度零件的加工要求。不同批次粉末的流动性差异会导致铺设厚度不均,PLC无法根据粉末层实际厚度反馈调整工作台下降量,可能出现层厚不一致导致的密度波动,影响零件强度与致密度^[3]。

3 PLC在SLM设备多轴控制中的优化策略

3.1 硬件架构升级提升控制基础性能

通过硬件架构优化可显著提升PLC控制的同步性与响应速度。采用“PLC+专用运动控制模块”的协同架构,主PLC负责逻辑控制与状态监测,新增基于FPGA的高速运动控制模块专门处理多轴同步任务,该模块的指令更新频率可大幅提高,将轴间相位差控制在极小范围内,有效解决累积误差问题。通信方式从脉冲控制升级为实

时工业以太网,PLC与伺服驱动器通过以太网进行数据交互,位置指令与反馈信号的传输延迟大幅降低,在多层加工时能保持稳定的同步精度,使层间误差控制在允许范围内,避免层间结合缺陷。为PLC配备高性能处理器与大容量存储器,提高数据处理速度与复杂轨迹指令的存储能力,使PLC能快速解析上位机传输的复杂路径数据,确保高速扫描时的指令连续性,满足复杂零件的加工需求。

3.2 控制算法改进优化运动特性

控制算法的改进可提升轨迹精度与动态响应能力,适应复杂零件加工需求。将传统线性加减速算法升级为S型加减速,通过PLC的运动控制指令库实现速度平滑过渡,使激光扫描头在拐角处的加速度变化率得到有效控制,减少因惯性冲击导致的轨迹偏移,改善复杂曲面的表面粗糙度,提升零件外观质量。采用基于时间戳的事件触发同步机制,为每个运动指令附加精确时间标签,激光开启、工作台升降、送粉启动等动作均以统一时基为基准,避免PLC扫描周期波动对时序的影响,使多层堆叠的累积误差控制在允许范围内,保证零件轴向尺寸精度^[4]。开发参数自适应算法并嵌入PLC程序,根据加工层数与实时温度数据自动调整各轴运动参数,例如随着零件高度增加,适当调整工作台升降速度以补偿热变形影响,同时调整送粉速率以保证粉末铺设密度,确保全程加工精度稳定,减少因环境变化导致的质量波动。

3.3 动态补偿机制消除误差来源

构建多维度动态补偿机制可消除环境与工艺因素导致的误差,提升加工精度稳定性。在PLC中集成温度-变形关联模型,通过红外温度传感器实时采集工作台温度,模型根据温度数据计算热变形量,自动修正位置指令以补偿热膨胀影响,使高度方向误差大幅减少,保证零件高度尺寸精度。引入振动监测补偿,在扫描头支架安装加速度传感器,PLC实时接收振动数据并通过滤波算法提取振动偏移量,即时调整相关轴运动指令以抵消振动影响,使轨迹偏差控制在极小范围内,提升零件轮廓精度。建立粉末-运动参数映射表,PLC通过检测设备获取粉末流动性参数,自动调用对应参数组,例如检测到粉末流动性变化时,适当调整送粉机构转速与扫描速度,确保不同批次粉末的熔池稳定性一致,减少因材料波动导致的质量差异。

4 优化方案的实验验证与效果分析

4.1 实验设计与测试指标

为验证优化方案的有效性,采用SLM设备进行对比实验,分别在传统PLC控制与优化后控制模式下加工相同零件。测试零件包括:高钛合金圆柱件(检测轴向尺寸

精度与层间结合强度)、带复杂曲面的不锈钢叶轮(检测平面轨迹精度与表面粗糙度)、铝合金薄壁件(检测动态响应速度与熔池稳定性)。测试指标包括:各轴运动同步误差(通过高速摄像机记录各轴动作时间差)、轨迹偏差(采用三坐标测量机检测实际尺寸与理论模型的差值)、加工缺陷率(通过工业CT检测零件内部气孔与未熔合比例)、参数切换响应时间(记录从材料更换到运动参数稳定的时间)、表面粗糙度(通过专用仪器检测)。实验过程中保持其他加工参数一致,仅改变控制模式,以确保实验结果的可比性。实验前对设备进行全面校准,包括各轴定位精度、激光功率稳定性、送粉均匀性等,确保初始状态一致。实验中安排专人记录各项数据,采用多次测量取平均值的方式减少偶然误差,同时邀请第三方专家对实验过程进行监督,保证实验的公正性与客观性。

4.2 实验结果与效果分析

实验结果表明优化方案显著提升了SLM设备的控制性能与加工质量。同步性方面,钛合金圆柱件的轴向尺寸误差从传统模式的较大范围降至允许公差内,层间结合强度明显提升,高速摄像机记录显示轴间动作时间差控制在极小范围内,消除了层间错位导致的气孔缺陷,零件致密度满足高端应用要求。轨迹精度方面,不锈钢叶轮的平面最大轨迹偏差大幅减小,表面粗糙度显著改善,复杂曲面拐角处的熔池稳定性明显提升,零件表面质量达到设计标准。动态响应方面,铝合金薄壁件加工中,参数切换响应时间大幅缩短,材料更换初期的熔池未熔合缺陷率显著降低,薄壁件的尺寸精度明显提高,满足复杂结构零件的加工需求。整体加工效率有所提升,因误差导致的零件报废率大幅下降,充分验证了优化方案的实用性与有效性,为SLM设备的技术升级提供了可靠依据^[5]。从应用价值来看,优化后的控制模式可适

应多种材料、多种结构零件的加工需求,拓展了SLM设备的应用场景,为航空航天、医疗等领域提供了更高质量的零件制造解决方案。

结语

PLC在激光增材制造(SLM)设备多轴运动协调控制中的应用优化,通过硬件架构升级、控制算法改进与动态补偿机制的协同作用,有效解决了传统控制模式下的同步性不足、响应滞后、精度补偿缺失等问题。实验结果表明,优化后的系统在同步误差、轨迹精度、动态响应速度上均有显著提升,能满足航空航天、医疗等领域高端零件的精密制造需求。未来需进一步探索PLC与人工智能算法的融合,例如通过深度学习模型预测温度与振动变化趋势,实现前瞻补偿;提升工业以太网在强电磁环境下的抗干扰能力,适应更高速度的多轴联动场景。这些改进将持续推动PLC技术在增材制造领域的应用深度,为高精度增材制造装备的自主创新提供有力支撑,助力制造业向更高精度、更高效率、更高质量的方向迈进。

参考文献

- [1]黄凯俊,柳玉文,文珊珊,等.选区激光熔化金属增材制造设备控制系统设计与研究[J].制造技术与机床,2024(9):119.
- [2]时云,王联凤,侍倩,等.高性能激光选区熔化增材制造设备的控制系统设计[J].制造业自动化,2021,43(3):21-23.
- [3]黄凯俊,柳玉文,文珊珊,等.选区激光熔化金属增材制造设备控制系统设计与研究[J].制造技术与机床,2022(6):37-43.
- [4]朱锦洪,王斌,尹丹青,等.送粉式等离子弧增材制造系统设计及工艺试验[J].河南科技大学学报(自然科学版),2023,44(6):1-8.
- [5]洪福,杨永强,吕佳乐,等.基于双机器人的增减材复合制造平台设计[J].机电工程技术,2023,52(9):74-78,88.