

基于PLC的金属增材SLM控制系统设计与稳定性优化研究

刘祖星 李园春

洛阳盈创极光精密制造有限公司 河南 洛阳 471822

摘要: 基于可编程逻辑控制器 (PLC) 的金属增材制造选择性激光熔化 (SLM) 控制系统具备高精度、强适应性与良好可扩展性的技术优势。在工业现场电磁干扰、机械振动、信号延迟及工艺参数波动等多重因素影响下, 系统的动态响应能力与过程稳定性面临严峻挑战。针对上述问题, 研究从硬件防护、结构优化、通信机制改进以及闭环调控等方面提出综合优化路径。系统架构兼顾安全性与灵活性, 能够在不同材料体系与几何特征的加工任务中保持稳定输出。研究成果为国产高端增材装备制造提供了可复制的技术范式, 推动了智能制造装备向自主可控方向发展。

关键词: PLC; 金属增材; SLM控制系统; 设计; 稳定性优化

选择性激光熔化技术作为金属增材制造领域的核心技术之一, 已广泛应用于航空航天、医疗器械和精密模具等高端制造领域。其通过逐层铺粉与高能激光束扫描相结合的方式, 实现三维金属零件的近净成形, 对控制系统的空间定位精度、时间同步性和过程稳定性提出了极高要求^[1]。传统控制系统多依赖专用数控平台或嵌入式架构, 存在开发周期长、维护成本高、兼容性差等问题。近年来, 随着PLC在运算速度、模拟量处理能力和网络通信性能上的持续提升, 其在复杂机电系统中的应用边界不断拓展。将PLC引入SLM设备控制体系, 不仅能够整合逻辑判断、安全连锁与运动调度功能, 还可借助模块化编程实现工艺参数的灵活配置与快速切换。当前亟需解决的问题在于如何克服工业现场复杂电磁环境、机械扰动与实时性瓶颈对成形质量的影响。

1 PLC在工业控制中的应用现状

可编程逻辑控制器自诞生以来, 逐步发展成为现代工业自动化领域的核心执行单元。其以高可靠性、强抗干扰能力和标准化编程语言著称, 广泛应用于流水线控制、机器人协调、能源管理及过程监控等多个场景。随着智能制造战略的推进, PLC不再局限于简单的开关量逻辑判断, 而是向高速数据处理、多轴联动控制与工业物联网接入方向演进。当前主流厂商如西门子、欧姆龙、三菱等推出的高端PLC产品已支持浮点运算、PID调节、CANopen/EtherCAT总线协议以及OPCUA通信接口, 使其具备承担复杂运动控制任务的能力。尤其在精密制造领域, PLC被用于协调多自由度平台的轨迹规划与外设设备的动作时序, 确保各子系统之间的协同一致性。相较于专用数控系统, PLC在系统集成度、故障诊断效率和后期维护便捷性方面展现出独特优势。其开放的软硬件生态允许开发者根据具体工艺需求进行功能扩展, 适用于非

标设备的定制化开发。

2 SLM控制系统设计

2.1 系统总体架构设计

本研究所构建的SLM控制系统采用分层分布式结构, 由上位机、PLC主控单元、伺服驱动模块、激光发生器、气氛控制系统及传感器阵列组成。上位机负责切片文件解析与工艺参数设定, 生成G代码指令序列并通过工业以太网传输至PLC。PLC作为中央控制节点, 接收指令后分解为运动轨迹命令、激光使能信号与辅助设备动作序列, 分别发送至X/Y/Z三轴伺服电机驱动器、激光控制器与铺粉机构执行单元。整个控制链路遵循“集中决策、分布执行”的原则, 确保各部件按照预设时序精确协作。系统配备独立的安全回路, 集成急停按钮、舱门限位开关与温度传感器, 一旦检测到异常状态立即切断动力输出。所有关键信号均采用屏蔽电缆连接, 并在电气柜内设置隔离继电器, 防止强电回路对弱电信号造成串扰。控制柜内部布局遵循散热优先原则, 发热元件远离I/O模块, 保障长时间运行下的电气稳定性。整体架构兼顾功能性与安全性, 为后续稳定性优化奠定物理基础。

2.2 PLC控制逻辑与功能模块划分

控制系统软件基于IEC61131-3标准编程规范开发, 采用结构化文本 (ST) 与梯形图 (LD) 混合编写方式, 提升程序可读性与调试效率。控制逻辑划分为五个功能模块: 初始化模块负责系统自检与坐标归零; 工艺解析模块读取G代码中的层厚、扫描速度、激光功率等参数并映射为内部变量; 运动控制模块调用内置插补算法生成平滑轨迹指令; 激光管理模块依据扫描路径启闭激光输出并调节功率等级; 状态监控模块实时采集各子系统反馈信号, 判断是否进入异常处理流程。各模块之间通过全局变量区共享数据, 避免频繁的数据拷贝操作。程序运

行采用循环扫描机制，每个扫描周期严格控制在10ms以内，满足基本实时性要求。所有关键操作均设置互锁条件，例如只有当工作舱密闭且保护气氛环境达标时才允许启动激光，有效防止误操作引发安全事故。系统记录每次作业的日志信息，包括起止时间、累计激光工作时长、报警事件等，便于后期追溯与工艺复现。

2.3 运动控制与激光功率调节策略

运动控制系统选用支持EtherCAT总线的高性能PLC，搭配高分辨率编码器实现全闭环位置反馈。X/Y振镜系统负责激光光斑的快速偏转，Z轴升降平台则完成逐层抬升动作。为保证扫描路径的连续性与加速度平稳性，采用S型加减速曲线进行轨迹规划，避免因突变速度引起机械冲击。激光功率调节采用数字模拟混合控制方式，PLC通过DA模块输出0~10V电压信号控制激光电源的工作电流，进而调整输出功率。为应对不同材料与厚度的需求，系统预设多组功率-速度匹配表，操作人员可根据工艺卡一键调用^[2]。在每一层扫描开始前，PLC自动加载对应参数并进行预热校准，确保能量输入的一致性。扫描过程中，若检测到粉末未完全熔融区域，可通过局部重扫策略进行补偿，提升成形致密度。

2.4 数据采集与人机交互界面设计

为实现全过程可视化监控，系统集成多种传感器用于采集舱内氧含量、温度场分布、层间平整度等关键参数。氧浓度传感器实时监测惰性气体纯度，当数值超过设定阈值时触发报警并暂停打印。红外热像仪安装于观察窗外部，非接触式获取熔池区域的热辐射图像，用于评估能量吸收均匀性。所有传感数据经A/D模块转换后上传至PLC，并通过OPCUA协议转发至上位机HMI界面。人机交互系统基于WinCC开发，提供三维模型预览、实时进度条、多通道趋势图与报警历史查询功能。操作人员可在触摸屏上直接修改部分非关键参数，如扫描间距、搭接率等，无需重新导入切片文件。界面布局清晰，关键状态以颜色编码标识，绿色表示正常运行，黄色提示预警，红色代表紧急停机，极大提升了操作直观性与响应速度。

3 系统稳定性影响因素与问题分析

3.1 环境干扰对控制系统稳定性的影响

工业现场存在大量变频器、大功率电机与无线通信设备，产生的电磁噪声极易通过传导或辐射途径侵入控制系统。PLC输入端口若未采取滤波措施，可能误判外部信号状态，导致错误启动或中断正在进行的扫描任务。瞬态脉冲干扰可致使Z轴丢失微步，造成层间错位，严重影响零件垂直度。电源波动同样不可忽视，电网电压骤

降可能导致PLC看门狗复位，程序被迫重启，中断时间足以使熔池凝固不均形成裂纹。此类问题在老旧厂房或共用配电系统的车间尤为突出，必须从硬件层面予以根治。

3.2 设备振动与机械结构误差带来的波动

SLM设备在运行过程中，铺粉辊往复运动、液压缸动作及冷却风扇运转均会产生周期性振动。这些机械扰动通过基座传递至光学平台，引起振镜镜片角度偏移，最终反映为激光焦点漂移。高频振动可使光斑直径扩大，边缘能量密度下降，导致边缘区域出现未熔颗粒。长期使用后导轨磨损、丝杠反向间隙增大等问题也会削弱定位精度。机械系统刚性不足已成为制约成形一致性的瓶颈之一。

3.3 控制信号传输延迟与响应不一致问题

尽管现代PLC支持高速总线通信，但在多节点并发传输场景下仍可能出现帧丢失或延迟累积现象。EtherCAT网络理论上可达1ms通信周期，但当连接多个从站设备时，实际平均延迟上升，最大抖动达到较高水平。这种不确定性直接影响激光开启时刻与扫描位置的同步精度^[3]。在高速扫描模式下，微小的时间偏差即对应显著的空间错位，足以破坏细小特征的完整性。更严重的是，若激光电源响应滞后于运动指令，会出现“空扫”或“重复曝光”现象，前者造成材料缺失，后者引发局部过热与球化效应，二者均为典型成形缺陷。

3.4 激光功率输出不稳定对成形质量的影响

激光器输出功率受电流稳定性、冷却效率与老化程度影响较大。连续工作数小时后，输出功率衰减明显，若无补偿机制，将导致后续层的熔深逐渐减小，形成阶梯状内部缺陷。启动瞬间的功率爬升过程若缺乏软启动控制，易产生初始飞溅，污染透镜表面。未经稳控的激光源在打印钛合金样品时，孔隙率显著上升，力学性能明显下降。由此可见，激光功率的动态稳定性最终决定最终构件的冶金质量与服役寿命。

4 稳定性优化策略

4.1 抗干扰设计与电磁兼容性优化

为提升系统抗扰能力，所有模拟量输入通道加装RC低通滤波电路，截止频率设定为合理范围，有效抑制高频噪声。数字量信号线全程使用双层屏蔽电缆，屏蔽层单点接地，避免地环路引入共模干扰。PLC供电前端配置在线式UPS与有源滤波装置，维持电压稳定在规定范围内。控制柜内部按功能分区布线，强弱电线电缆垂直交叉走线，间距保持足够距离。关键I/O模块加装TVS瞬态抑制二极管，防止雷击或开关浪涌损坏芯片^[4]。整机通过国家电磁兼容试验认证，静电放电抗扰度达标，辐射发射限值

符合行业标准,确保在复杂电磁环境下长期可靠运行。

4.2 机械结构优化与减振措施实施

设备整体安装于主动隔振平台上,该平台内置气浮支撑系统,固有频率低于设定阈值,可有效隔离地面振动传递。光学组件固定于花岗岩基座之上,利用其高阻尼特性吸收高频震动。运动导轨采用预紧滚珠丝杠配合伺服电机驱动,消除反向间隙,采用外部光栅尺组成全闭环控制系统,定位精度显著提升。铺粉机构改用柔性连接传动,减少动力传递过程中的冲击载荷。定期开展机械校准,使用激光干涉仪检测各轴线性度与垂直度,确保几何误差控制在允许范围内。经过结构优化后,振动加速度峰值大幅降低,显著改善了扫描光路的稳定性。

4.3 控制系统通信协议优化与实时性提升

将原有自由口通信升级为标准EtherCAT协议,拓朴结构改为星型连接,缩短通信链路长度,降低信号衰减。主站刷新周期锁定为固定值,启用分布式时钟同步机制,确保所有从站时间误差控制在极小范围内。关键控制指令优先级设为最高,避免非实时数据占用带宽。激光使能信号通过专用硬连线备份,即使总线中断仍可保障基本安全功能。经优化后,系统平均通信延迟稳定在理想区间,抖动控制在可接受范围,满足高速扫描同步需求。实际打印测试表明,特征边缘清晰度明显提高,最小可分辨线条宽度显著缩小^[5]。

4.4 激光功率闭环反馈控制策略应用

引入光电探测器实时监测激光输出功率,信号经调理电路送入PLC模拟量输入端,构成闭环反馈回路。PLC内部运行增量式PID算法,比较设定值与实测值偏差,动态调整DA输出电压以补偿功率波动。采样周期设定合理,比例系数、积分时间与微分时间经反复调试获得最优响应特性。启动阶段启用斜坡函数实现软启动,在规定时间内平稳升至目标功率,避免电流冲击。长时间运

行测试显示,闭环控制下功率波动范围显著缩减,成形件密度均匀性显著改善,内部气孔数量明显减少。

结论

本研究成功构建了一套基于PLC的金属增材制造SLM控制系统,实现了从工艺解析到执行控制的全流程自动化管理。针对影响系统稳定性的多重因素,提出了涵盖电磁防护、结构强化、通信优化与功率闭环在内的综合性改进方案。实验验证表明,优化后的系统在抗干扰能力、运动精度、响应实时性与能量控制稳定性方面均取得显著提升,能够满足高要求金属构件的批量化制造需求。该方案具备良好的工程推广价值,为国产增材制造装备的智能化升级提供了切实可行的技术参考。未来将进一步融合人工智能算法,实现工艺参数的自适应调节与缺陷预测,推动SLM技术向更高水平发展。

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]张大俊,宋黎明,李恒,等.激光功率对PLC控制的SLM成形SiC增强铝基复合材料组织与性能的影响[J].精密成形工程,2024,16(6):92-99.
- [3]李惠,李微娜,祁俊峰,等.SLM增材制造铝合金和高温合金微流道磨粒流抛光工艺研究[J].材料开发与应用,2024,39(2):1-8,16.
- [4]鄢晨华,李东铭,胡译文,等.SLM增材制造316L钢超材料的弹性各向同性优化研究[J].固体力学学报,2025,46(2):192-205.
- [5]徐博文,沈理达,成海霞,等.射流电解修整SLM不锈钢表面工艺参数优化研究[J].机械设计与制造,2023,393(11):64-70.