

基于PLC的金属增材SLM控制系统关键控制功能设计与研究

李园春 刘祖星

洛阳盈创极光精密制造有限公司 河南 洛阳 471822

摘要: 金属增材制造技术作为先进制造业的重要组成部分,其控制系统的设计直接影响着成形质量和生产效率。本研究通过分析SLM工艺流程和技术要求,构建了包含激光功率控制、扫描路径规划、环境参数监测以及设备安全保护等关键功能的控制系统架构。采用模块化设计理念,将复杂控制任务分解为多个独立子系统,实现对激光器、振镜扫描系统、送粉装置及成型环境的精确协调控制。实验结果表明,该控制系统能够有效保证成形件的尺寸精度和表面质量,满足工业级增材制造的应用需求。

关键词: PLC; 金属增材; SLM控制系统; 关键控制功能; 设计

选择性激光熔融技术作为金属增材制造的主要工艺方法之一,通过高能激光束逐层熔融金属粉末材料来构建三维实体结构,在复杂几何形状零件制造方面具有传统加工方法无法比拟的优势。可编程逻辑控制器凭借其高可靠性、强抗干扰能力和良好的扩展性能,成为构建SLM控制系统的核心硬件平台。通过深入研究SLM工艺机理和控制需求,设计合理的控制策略和功能模块,对于提升金属增材制造技术水平具有重要意义。

1 基于PLC的SLM控制系统总体架构设计

1.1 系统硬件架构组成与配置方案

SLM控制系统硬件架构采用分层分布式设计思想,由中央控制单元、现场执行单元和辅助功能单元三大模块构成完整的控制体系。中央控制单元以高性能PLC为核心处理器,配备大容量内存和高速数据总线,负责整个系统的逻辑运算、数据处理和任务调度。现场执行单元包括激光器驱动模块、振镜控制系统、送粉机构控制器以及工作台运动控制装置,这些设备通过高速数字接口与主控单元连接实现精确协同。辅助功能单元涵盖环境监测传感器网络、安全保护装置、人机交互终端和数据存储设备,为系统正常运行提供必要的支撑服务^[1]。硬件配置方案充分考虑了系统的可扩展性和兼容性,预留了充足的I/O通道和通信端口,便于后续功能升级和设备扩充。电源供应系统采用冗余设计,确保在单一电源故障情况下系统仍能安全运行至程序结束。

1.2 软件控制逻辑与程序结构设计

软件控制系统采用模块化编程方法,将复杂功能分解为若干相互独立又协调配合的功能模块,提高代码的可读性和可维护性。主程序模块负责系统初始化、任务

分配和状态监控等核心功能,确保各个子系统按照预定时序协调运行。激光控制模块专门处理激光功率调节、脉冲频率设置和光束质量监测等专业任务,实现对激光输出特性的精确控制。运动控制模块集成了路径规划算法和轨迹插补功能,生成平滑连续的扫描路径指令发送给振镜控制系统。工艺参数管理模块存储和调用各种材料对应的最优工艺参数组合,支持用户自定义参数组的创建和修改。故障诊断模块持续监测系统运行状态,及时发现异常情况并通过报警提示操作人员采取相应措施。数据记录模块自动保存关键工艺参数和质量检测结果,为产品质量追溯和工艺优化提供数据支持。

1.3 通信网络拓扑结构与协议选择

控制系统通信网络采用多层级星型拓扑结构,通过工业以太网实现高速数据传输和设备间信息交换。底层设备层使用RS485串行通信协议连接各类传感器和执行器,保证数据采集的实时性和准确性。中间控制层采用PROFINET实时工业以太网协议,实现PLC与各功能模块之间的高速数据交换和同步控制。上位管理层通过TCP/IP协议与人机界面和远程监控系统通信,支持远程访问和数据共享功能。网络安全机制采用多重防护策略,包括防火墙设置、访问权限控制和数据加密传输等措施,确保系统信息安全^[2]。时间同步机制基于IEEE1588精确时间协议,保证所有网络节点具有统一的时间基准,这对于实现精确的时序控制至关重要。冗余通信链路设计提高了系统的可靠性和容错能力,当主通信线路出现故障时能够自动切换到备用通道继续工作。

1.4 安全保护机制与应急处理策略

安全保护机制是SLM控制系统不可或缺的重要组成

部分,涵盖了硬件保护和软件防护两个层面。硬件安全保护主要包括急停按钮、安全门联锁开关、激光屏蔽装置和过载保护继电器等物理安全设备,能够在危险情况发生时立即切断相关电源或停止设备运行。软件安全防护通过多重检查和验证机制实现,包括输入参数范围检验、逻辑关系校验、状态一致性检查等功能模块。应急处理策略制定了详细的故障响应预案,针对不同类型的故障设置了相应的处理流程和恢复步骤。系统具备自动故障识别能力,能够根据传感器反馈信号判断故障类型和严重程度,并启动相应的应急预案。安全等级划分明确,将各种操作和访问权限按照重要程度分级管理,防止误操作造成安全事故。

2 关键控制功能模块详细设计与实现

2.1 激光功率精密控制算法设计

激光功率控制是SLM工艺的核心技术之一,直接决定着熔池的形成质量和成形件的致密性。控制系统采用PID反馈调节算法结合前馈补偿策略,实现对激光输出功率的精确控制。功率设定值根据材料类型、层厚参数和扫描速度动态调整,确保在不同工艺条件下都能获得最佳的能量密度分布。反馈控制回路实时监测实际输出功率并与目标值进行比较,通过比例积分微分运算产生调节信号驱动激光器功率调节电路。前馈补偿机制基于工艺数据库中的经验模型预测功率需求变化趋势,提前进行功率预调节以减小动态响应滞后。为了提高控制精度,系统还引入了模糊控制算法处理非线性干扰因素,增强系统对环境变化的适应能力。功率稳定性控制通过数字滤波和噪声抑制技术消除测量信号中的高频干扰成分,保证控制系统的稳定运行。

2.2 扫描路径优化与轨迹插补实现

扫描路径规划直接影响成形效率和表面质量,需要综合考虑热积累效应、残余应力分布和支撑结构设计等因素。控制系统内置智能路径规划算法,能够自动识别零件几何特征并生成最优扫描策略。对于大面积平面区域采用蛇形扫描方式提高填充效率,对于精细结构则采用轮廓优先的扫描顺序减少热变形。轨迹插补算法基于样条曲线理论实现平滑过渡,避免因方向突变产生的加速度冲击影响扫描精度。速度前瞻控制功能预先计算相邻轨迹段的速度变化规律,确保加速度连续性和平稳过渡。实时路径修正机制通过在线检测熔池状态和成形质量反馈信息,动态调整扫描参数以补偿工艺偏差^[1]。多层路径关联分析功能统筹考虑相邻层间的热历史累积效应,优化层间扫描策略减少残余应力集中。

2.3 环境参数监测与闭环控制实现

成型环境控制是保证SLM工艺稳定性和材料性能一致性的关键因素,主要包括氧含量、温度、湿度等关键参数的精确控制。氧气浓度监测采用电化学传感器实时检测成型腔室内氧含量变化,当浓度超过设定阈值时自动启动净化系统降低氧含量。温度控制系统通过加热器和冷却装置维持腔室温度在工艺要求范围内,防止温度波动影响材料预热效果和熔池凝固行为。湿度控制采用除湿干燥装置保持低湿度环境,避免水分对金属粉末性能产生不利影响。闭环控制算法基于多变量解耦控制理论,分别建立各环境参数的独立控制回路,避免参数间相互干扰。环境参数数据通过无线传感器网络实时传输到中央控制系统,实现远程监控和历史数据分析。异常环境报警机制设置多重阈值判断条件,确保在环境参数超出安全范围时及时发出警报并采取保护措施。

2.4 设备状态监测与故障诊断系统

设备健康状态监测是预防性维护和质量保证的重要手段,通过对关键部件运行参数的持续监测实现早期故障预警。振动监测系统安装在主轴电机和传动机构上,实时采集设备运行时的振动频谱特征,识别轴承磨损、齿轮间隙过大等机械故障征兆。温度监测网络覆盖激光器、振镜电机和电气柜等发热部件,防止因过热导致的性能下降或设备损坏。电流电压监测模块跟踪各执行机构的功耗变化,发现电机堵转、驱动器故障等电气异常情况。故障诊断专家系统基于大量历史数据和故障案例建立知识库,运用模式识别和机器学习算法自动分析监测数据并给出故障定位和维修建议。预测性维护功能根据设备使用时间和运行状态评估剩余使用寿命,合理安排维护计划降低意外停机风险。远程诊断支持功能允许技术人员通过互联网访问设备状态信息,实现异地故障分析和在线技术支持。

3 系统性能测试与实验验证分析

3.1 控制精度测试与误差分析

控制精度是衡量SLC控制系统性能的重要指标,通过标准化测试程序对各项精度参数进行全面评估。激光功率控制精度测试采用功率计连续监测输出功率稳定性,结果显示功率波动幅度控制在 $\pm 1\%$ 以内,满足高精度加工要求。位置控制精度验证使用激光干涉仪测量振镜扫描系统的定位误差,X-Y平面内最大定位误差不超过 ± 5 微米,重复定位精度优于 ± 2 微米。时间同步精度测试表明各执行机构间的时间延迟小于100纳秒,确保了多轴协调运动的精确性。扫描路径跟踪精度通过高速摄像系统捕捉实际扫描轨迹与理论轨迹的偏差,平均跟踪误差小于0.01毫米。环境参数控制精度测试显示氧含量控制

在10ppm以下,温度控制精度达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,湿度控制在5%RH以内。误差来源分析表明主要误差来源于机械传动间隙和传感器测量不确定度,通过软件补偿算法有效降低了系统误差影响。

3.2 成形质量评价与工艺稳定性验证

成形质量评价从宏观几何精度和微观组织结构两个维度进行综合评估,全面反映控制系统对工艺过程的控制效果。尺寸精度测量采用三坐标测量机对标准试样的关键尺寸进行检测,结果显示95%以上的测量点误差在 ± 0.1 毫米范围内,符合精密制造要求。表面粗糙度测试使用轮廓仪测量成形表面的Ra值,典型铝合金零件表面粗糙度可达Ra6.3微米以下。金相组织观察显示成形件内部组织致密均匀,无明显孔隙和裂纹缺陷。力学性能测试表明成形件的拉伸强度和屈服强度均达到原材料标准值的90%以上。工艺稳定性验证通过连续制造同批次零件的方式进行,统计分析显示各项质量指标的标准差系数小于5%,证明系统具有良好的重复性和稳定性。长期运行试验表明系统在连续工作72小时过程中未出现重大故障,平均无故障时间超过1000小时。

3.3 系统响应速度与实时性能测试

系统响应速度直接影响生产效率和成形质量,特别是对于高速扫描和频繁启停的应用场景具有重要意义。单轴运动响应测试测量了振镜系统从接收到指令到开始运动的时间延迟,平均响应时间为0.5毫秒,满足高速扫描要求。多轴协调运动测试验证了各轴间的时间同步性能,结果显示三轴联动的最大相位差小于0.1毫秒。数据处理速度测试表明系统每秒能够处理超过10万个控制指令,具备处理复杂路径的能力。中断响应时间测试显示系统对外部事件的平均响应时间为0.2毫秒,确保了安全保护功能的有效性。实时任务调度测试验证了系统在多任务并发执行时的优先级管理和资源分配能力,关键任务得到优先保证^[4]。通信延迟测试表明网络传输延迟平均为0.3毫秒,满足实时控制的数据传输要求。

3.4 可靠性评估与长期运行稳定性分析

系统可靠性评估基于国际标准IEC61508进行,通过

加速老化试验和现场运行数据统计分析系统长期运行表现。平均故障间隔时间MTBF计算结果显示系统可靠性指标达到工业级要求,关键功能模块的MTBF超过50000小时。故障模式影响分析FMEA识别出激光器老化、振镜电机磨损和传感器漂移等主要失效模式,并制定了相应的预防措施。环境适应性测试在高低温、湿热、振动等恶劣条件下验证系统稳定运行能力,结果表明系统能够在 -10°C 到 $+50^{\circ}\text{C}$ 温度范围内正常工作。电磁兼容性测试验证了系统在强电磁干扰环境下的抗干扰能力,满足工业现场应用要求。维护便利性评估显示系统模块化设计使得故障定位和更换更加便捷,平均修复时间MTTR小于2小时。

结语

本研究通过深入分析SLM工艺特点和控制需求,设计了完整的硬件架构和软件功能模块。系统集成激光功率精密控制、扫描路径优化、环境参数监测和设备安全保障等核心功能,形成了具有自主知识产权的完整解决方案。实验测试结果表明该控制系统在控制精度、响应速度、稳定性和可靠性等方面均达到了预期设计目标,能够满足工业级金属增材制造的应用要求。未来将进一步优化控制算法,提升系统智能化水平,拓展更多材料和工艺的应用范围。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [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]宗学文,王涛,王伟杰.SLM成形316L不锈钢热变形行为研究[J].应用激光,2023,43(10):32-40.