

基于优化的插补算法的激光焊接控制系统的设计与研究

成慧翔

晋中信息学院 山西晋中 030800

摘要: 相比传统焊接方式,激光焊接技术更利于生产大批量自动化的中小型组件,有助于提高产品设计的灵活性,使制造更加数字化,更加智能化。激光焊接功率密度较大,对于坚固材料也可以进行较好的焊接。在质量方面,经过激光焊接工序后的组件,无焊疤,无变形,焊接处平滑,也更利于减少后续打磨工序,方便更高效地进行产品制造。基于此,以下对基于优化的插补算法的激光焊接控制系统的设计进行了探讨,以供参考。

关键词: 插补算法;激光焊接控制系统;设计与研究

引言

随着工业智能化发展,激光焊接对控制系统的实时性与鲁棒性提出更高要求。现有插补算法在复杂轨迹规划中存在累积误差,导致焊接缺陷。通过引入优化算法动态修正插补路径,结合传感器反馈构建闭环控制系统,可显著降低焊接误差。

一、激光焊接控制系统的基本概念

激光焊接控制系统是一种通过精确调控激光能量、焊接路径及工艺参数以实现高质量焊接的自动化系统,其核心在于将激光器、运动控制、传感器反馈与算法优化有机整合。该系统以高能量密度的激光束作为热源,通过数控平台驱动工件或激光头按预设轨迹运动,同时实时监测焊接过程中的熔池形态、温度场分布等关键参数,形成闭环控制^[1]。激光焊接控制系统的硬件架构通常包括激光发生器、光学聚焦系统、高精度运动平台、工业计算机及传感器模块(如视觉传感器、红外测温仪),软件层面则依赖插补算法、PID控制或智能优化算法(如模糊控制、神经网络)实现动态调整。插补算法负责将离散的加工路径转化为连续的运动指令,其精度直接影响焊缝成形质量;而优化算法则通过在线修正功率、速度等参数,补偿热变形或外界干扰引起的偏差。现代激光焊接控制系统进一步融合数字孪生技术,通过

虚拟仿真提前预测焊接缺陷并优化工艺,显著提升生产效率和一致性。

二、优化插补算法的理论分析

(一) 插补预备知识

在数控加工与激光焊接控制系统中,插补算法是实现精密运动控制的核心技术。现代工业对插补功能提出了严格的技术要求:首先必须确保插补精度可控,消除累计误差,将局部偏差限制在工艺允许范围内;其次要求算法计算高效简洁,同时保证控制系统具有快速的运行速度和均匀的脉冲输出特性;最后还需优化初始数据需求,提高系统响应效率。当前主流的插补方法可分为基准脉冲插补和数据采样插补两大体系,其中基于逐点比较原理的脉冲增量插补技术因其独特的优势在二维坐标控制领域得到广泛应用(如图1)。该技术通过离散化处理,采用逐步逼近的方式实现轮廓加工,其误差可精确控制在一个脉冲当量内,通过参数优化即可满足高精度加工需求^[2]。具体实现过程包含四个关键环节:首先进行实时偏差分析以确定进给方向,随后执行坐标轴步进运动,接着重新计算位置偏差,最后进行终点条件判断。这种闭环控制机制通过周期性位置修正,确保加工轨迹与理论轮廓保持最小偏差,直至完成整个加工过程。该方法的模块化设计使其具有优异的实时性和可靠性,特别适用于需要高动态响应的工业自动化场景。

(二) 直线型插补算法

直线型插补算法是激光焊接控制系统中最基础的运动控制方法,其核心任务是将离散的数控指令转化为连续且平滑的直线运动轨迹。在激光焊接过程中,直线插补的精度直接影响焊缝的直线度与均匀性。该算法通过

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(基于改进神经网络的激光焊接偏差智能识别研究2023L514)

作者简介: 成慧翔(1985年--),女,汉族,山西太原人,研究生,副教授,研究方向:智能控制。

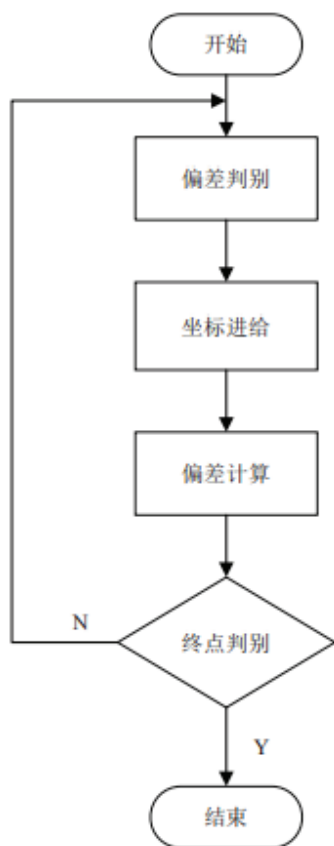


图1 逐点比较法的工作流程图

计算起点与终点之间的坐标增量，按照设定的进给速度均匀分配各轴的运动步长，确保激光头沿理论直线路径移动。由于机械传动系统存在惯性、摩擦等非线性因素，单纯依靠线性插补可能导致实际轨迹偏离理想路径，因此需结合前馈补偿或自适应滤波技术抑制跟随误差^[3]。此外，激光焊接的热输入特性要求插补过程需动态调整激光功率与移动速度的匹配关系，例如在拐角或端点处降低速度以避免能量堆积。现代优化方法如模型预测控制（MPC）可嵌入直线插补算法，通过多步预测提前优化运动参数，进一步提升轨迹精度。直线插补的局限性在于无法直接处理复杂曲线，需依赖后续的曲线分割或高阶插补算法补充，但其高效性与稳定性使其仍是激光焊接基础路径规划的首选方案。

（三）圆和圆弧型插补算法

圆和圆弧型插补算法用于生成激光焊接中的曲线轨迹，其数学本质是通过参数方程或逐点逼近法将离散指令转化为光滑的圆弧运动。该算法需解决圆心坐标、半径及起止角度的几何计算问题，同时协调多轴联动的速度与加速度约束，避免离心力导致的机械振动。圆弧

插补的经典实现方式包括逐点比较法、数字微分分析器（DDA）法，以及基于泰勒展开的递归逼近法，其中递归法可通过迭代减少计算量，更适合实时控制。在激光焊接中，圆弧路径的平滑性对熔池稳定性至关重要，若插补点密度不足会导致焊缝出现锯齿状纹路，因此需根据曲率自适应调整插补步长。焊接热循环对圆弧插补提出特殊要求，例如在曲率半径较小的区域需降低焊接速度以保证热输入均匀。优化方向包括引入样条插值预处理原始路径，或结合贝塞尔曲线实现局部平滑过渡。

（四）曲线型插补算法

曲线型插补算法面向激光焊接中的自由曲面或复杂轮廓加工，其核心挑战在于平衡轨迹精度与实时性。常见的曲线插补方法包括参数化样条（如NURBS）、多项式拟合及基于机器学习的自适应插补。NURBS插补通过控制点与权重系数灵活描述任意曲线，支持曲率连续变化，适用于航空航天异形结构件的焊接。其优化重点在于实时解算NURBS参数方程时如何降低计算延迟，例如采用分段线性近似或硬件加速（FPGA）^[4]。多项式拟合算法（如五次样条）则通过高阶导数保证运动平滑性，但需解决过冲与振荡问题，通常结合前瞻控制（Look-ahead）技术动态调整进给速度。在激光焊接中，曲线插补还需考虑工艺约束，例如在陡峭曲率变化处同步调节光斑聚焦位置与功率密度。新兴的智能优化方法如强化学习可通过训练历史数据预测最优插补参数，减少人工调参依赖。

三、基于优化的插补算法的激光焊接控制系统的设计

（一）主控芯片与核心控制电路的选型与设计

激光焊接控制系统的核心运算与实时决策依赖于高性能主控芯片，其选型需综合考虑计算能力、实时性及扩展性。现代激光焊接系统通常采用多核架构处理器（如ARM Cortex-A系列或DSP芯片），以满足插补算法的高频运算需求，同时支持多任务并行处理。主控芯片需具备硬件浮点运算单元（FPU）以加速轨迹规划中的矩阵运算，并集成高速通信接口（如EtherCAT或PCIe）确保与外部模块的低延迟数据交互。核心控制电路设计需遵循电磁兼容性（EMC）原则，采用多层PCB布局隔离数字与模拟信号，避免高频噪声干扰。电源管理模块需提供稳定的多电压输出，并通过看门狗电路增强系统鲁棒性。优化方向包括引入FPGA协处理器加速插补算法的并行计算，或通过异构计算架构（如CPU+GPU）分担视觉处理等非实时任务。

（二）激光发生器与驱动模块的协同设计

激光发生器作为系统的能量输出核心，其与驱动模块的协同设计直接影响焊接质量与稳定性。光纤激光器因其高光束质量与长寿命成为主流选择，驱动模块需支持脉冲/连续双模式调制，并具备纳秒级响应能力以适应动态工艺需求。激光功率的闭环控制通过高速DAC模块实现，结合PID算法实时调节电流以抑制输出波动^[5]。驱动电路需集成过温、过流保护功能，采用SiC或GaN功率器件提升开关频率与能效。关键优化点在于激光-运动同步策略，例如通过硬件触发信号确保功率调整与插补轨迹的严格时序对齐，避免因通信延迟导致能量分布不均。此外，光束整形模块（如振镜或准直透镜）的驱动需与主控系统共享时钟源，减少多轴协同误差。未来趋势是激光器与驱动模块的智能化集成，例如内置AI芯片实现焊接参数的自主优化。

（三）运动控制平台与机械结构的集成设计

运动控制平台需实现激光头或工件的高精度定位，其机械结构设计与控制算法的匹配是系统性能的关键。线性电机或直线模组因其无背隙特性被广泛采用，搭配高分辨率编码器（如光栅尺）形成全闭环控制。机械架构需优化刚性以抑制振动，例如采用有限元分析（FEA）优化横梁拓扑结构，或使用碳纤维材料减轻移动质量。多轴协同控制依赖EtherCAT总线实现同步通信，并通过交叉耦合补偿算法消除轴间跟随误差。对于复杂轨迹焊接，运动平台需支持动态刚度调节，例如基于负载惯量实时调整伺服增益。集成设计还需考虑热变形补偿，例如在机械臂关节嵌入温度传感器并建立热误差模型。前沿方向包括磁悬浮平台的引入，以彻底消除摩擦损耗，或采用模块化设计实现快速换装以适应多品种生产。

四、基于优化的插补算法的激光焊接控制系统的管理措施

（一）系统可靠性管理与容错机制设计

激光焊接控制系统的高可靠性管理需从硬件冗余、软件容错及故障预测三方面综合设计。硬件层面采用双总线通信架构，当主通信链路中断时自动切换至备用通道，确保控制指令的持续传输。关键模块如主控芯片与驱动电路实施热备份机制，通过心跳包监测实现毫秒级故障切换。软件容错通过多层次校验实现，包括指令CRC校验、运动轨迹边界检测及激光功率超限保护，任何异常触发立即进入安全状态。故障预测模块基于历史运行数据构建寿命模型，利用机器学习算法预判传感器

老化或机械磨损趋势，提前安排维护窗口。系统还需集成自诊断功能，启动时自动检测各模块状态，并通过人机界面直观显示健康评分。为应对突发断电，配置超级电容组为关键电路提供应急供电，保障数据保存与机械制动。

（二）实时性能优化与资源调度策略

激光焊接控制系统的实时性保障依赖于精细化的资源调度与任务优先级管理。采用时间触发架构（TTA）划分任务周期，将插补计算、传感器采集等关键任务分配至固定时间片，确保截止期限严格满足。内存管理使用静态分配与内存池技术，避免动态内存分配引起的不可预测延迟。多核处理器通过亲和性绑定将实时任务固定至专用核心，非实时任务（如日志记录）迁移至低优先级核心。中断处理采用嵌套向量中断控制器（NVIC）分级策略，激光急停等关键中断设为不可屏蔽类型。通信优化方面，EtherCAT总线使用DC同步时钟实现各节点亚微秒级时间同步，数据帧采用优先级标记确保运动控制报文优先传输。系统还需定期进行最坏情况执行时间（WCET）分析，通过插补算法循环展开或SIMD指令集加速关键路径。

（三）工艺知识库与自适应学习机制

构建可进化的工艺知识库是实现激光焊接智能化管理的核心措施。知识库采用三层架构：基础层存储材料参数库（如碳钢、铝合金的光吸收率），中间层记录历史工艺参数与焊接质量关联数据，顶层为经过验证的优化策略集合。系统在运行中持续收集焊接过程中的多模态数据，包括熔池图像频谱特征、等离子体发射光谱等，通过特征提取技术转化为标准化描述符。自适应学习机制包含在线与离线双模式，在线学习通过增量式算法实时微调插补参数，离线学习则利用深度强化学习挖掘工艺规律。知识更新采用专家审核与自动筛选结合机制，新策略需在虚拟焊接仿真验证后才会导入生产环境^[7]。为提升知识复用性，建立基于本体论的工艺语义网络，实现不同材料-厚度组合的参数智能推荐。系统还需设计知识衰减模型，对长期未使用的旧工艺数据自动降权，确保推荐结果的时效性。

结束语

改革开放以来，我国就一直很重视激光焊接控制技术的发展，近年来也将激光焊接控制技术列入了国家重大技术专项。在国家基金的大力支持和国内众多专家学

者们的探索与研究之后，我国在激光焊接控制系统领域也取得了一系列的重要研究成果，但是总体上和西方工业强国还是有较大的差距。因此，研究多种类型的插补算法，对于提高焊接工件的焊接质量和焊接效率，提高我国的激光焊接控制系统的技术水平，扭转当前国内在高端焊接控制系统被西方工业强国垄断的局面，提升我国焊接控制系统的自主创新能力，缩小与国外差距，有着极其重大的意义。

参考文献

- [1] 李旭阳. 铝合金激光焊接熔池中气孔控制方法[J]. 时代汽车, 2025, (07): 135-137.
- [2] 周水清, 邬啸宇, 李俊朋, 等. 浅析全自动激光焊接控制系统设计[J]. 中国设备工程, 2024, (24): 177-179.
- [3] 李航, 赵锋, 苏传义, 等. 激光焊接中高强板零件的数据控制研究[J]. 锻造与冲压, 2024, (08): 31-36.
- [4] 陈玉龙, 别渭毅, 鲁军, 等. 超薄板脉冲激光焊接工艺特性及成形质量控制[J]. 航天制造技术, 2024, (01): 38-42.
- [5] 瞿将江, 王鑫鑫. 基于FPGA的激光焊接控制系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2024, (01): 155-157.