



图 2 杂散电流干扰风险预警与应急处置流程图

6 结语

杂散电流干扰是管道阴极保护系统失效的主要原因，其源头复杂、干扰机理多样，单一治理手段难以实现有效管控。本文结合某长输油气管道工程实例，提出的“源头控制-路径阻断-末端防护-监测预警”全链条综合整治方案，通过各技术环节的协同应用，实现了杂散电流干扰的精准防控。源头控制减少杂散电流生成，路径阻断截断传播渠道，末端防护强化管道自身抵御能力，监测预警与运维管理保障方案持续有效，构建闭环治理体系，可大幅提升管道阴极保护系统的稳定性，抑制管道腐蚀，保障管道安全运行。未来，通过技术创新与管理优化，可进一步提高管道杂散电流干扰的综合整治水平，为能源输送管道的长期安全运行提供坚实

支撑。

参考文献

- [1] 吴少炯,刘东明,巩越,等.输气管道受地铁杂散电流干扰测试与干扰规律分析[J].特种设备安全技术,2025,(04):26-27+31.
- [2] 朱梁,赵伟.某成品油长输埋地管线受交流杂散电流干扰的监测和防护[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):265-269.
- [3] 谢成.油气管道天空地一体化保护实践[J].管道保护,2025,2(02):91-96.
- [4] 别博,覃立帅,杨飞城.强干扰地区杂散电流干扰治理实例[J].全面腐蚀控制,2025,39(03):91-94+100.
- [5] 熊道英,王焱,葛宝玉,等.强制电流阴极保护系统典型故障原因分析及整改措施[J].材料保护,2025,58(03):174-180.

Electrical control system for fabric laser cutting machine

He Zhou

Beijing Shougang Resource Recycling Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

As a vital processing technology in modern textile and apparel manufacturing, laser cutting has gained widespread application in fabric processing owing to its high precision, flexibility, and advanced automation. The electrical control system serves as the core component of fabric laser cutting machines, where its performance directly determines the equipment's operational stability, cutting accuracy, and intelligent capabilities. This study investigates the design and implementation of electrical control systems for fabric laser cutting machines, conducting comprehensive analysis across system architecture, motor control, power supply and signal processing, sensor feedback, software control logic, and human-machine interaction. Through coordinated optimization of servo drive systems, motion control algorithms, and laser power regulation, the research establishes an efficient and stable electrical control framework. The findings provide critical technical support for intelligent upgrades in textile equipment manufacturing, while demonstrating practical significance in advancing the application of laser processing technologies within light industry sectors.

Keywords

fabric laser cutting machine; electrical control system; servo drive; motion control; intelligent

布料激光切割机的电气控制系统

周贺

北京首钢资源循环科技有限公司, 中国 · 北京 100000

摘要

激光切割技术作为现代纺织与服装制造业的重要加工手段,因其高精度、高柔性和自动化程度高的特点,在布料裁剪领域得到了广泛应用。电气控制系统是布料激光切割机的核心部分,其性能直接影响设备的运行稳定性、切割精度与智能化水平。本文围绕布料激光切割机的电气控制系统设计与实现展开研究,从系统总体架构、电机控制、电源与信号处理、传感器反馈、软件控制逻辑及人机交互等方面进行深入分析。通过对伺服驱动系统、运动控制算法及激光功率调节的协同优化,建立高效稳定的电气控制体系。本文研究为纺织装备智能化升级提供了关键技术支撑,对促进激光加工技术在轻工业领域的推广应用具有现实意义。

关键词

布料激光切割机; 电气控制系统; 伺服驱动; 运动控制; 智能化

1 引言

近年来,随着纺织服装产业向柔性制造和智能加工方向发展,传统机械式布料裁剪方式已难以满足高效率与高精度的生产需求。激光切割机凭借非接触式加工、无刀具磨损、热影响区小及自动化程度高等优势,逐渐成为布料裁剪的主流设备。然而,在实际应用中,由于布料材质柔软、易变形,激光切割系统对运动精度、功率调节及温控反馈提出了更高要求。电气控制系统作为激光切割机的核心模块,其设计是否合理决定了整机的性能稳定性与加工质量。当前,布料激光切割机的控制系统正由传统的开环控制向智能闭环控制、网络化监测及数据驱动优化方向发展。如何在保障高精度定位的同时,提升系统响应速度与抗干扰能力,是行业研发的

关键问题^[1]。本文以布料激光切割机为研究对象,系统分析其电气控制体系结构与工作原理,构建以 PLC+ 运动控制卡为核心的综合控制平台,探讨伺服电机驱动、激光功率调节与传感器协同控制策略,为设备性能优化与系统集成提供理论与技术依据。

2 电气控制系统总体设计与构成

2.1 系统总体架构

布料激光切割机的电气控制系统由主控单元、运动控制模块、激光功率控制单元、传感器检测单元及安全防护模块组成。主控单元采用 PLC (Programmable Logic Controller) 与运动控制卡结合的方式,通过工业以太网实现多轴协同与实时数据通信。系统核心功能包括坐标定位、路径插补、功率调节、反馈监控及异常报警。各功能模块通过 CAN 总线与 RS-485 协议互联,形成多层次分布式控制网络。控制系统电源采用隔离稳压设计,确保信号稳定性与

【作者简介】周贺(1985-),男,中国辽宁辽阳人,本科,工程师,从事自动控制研究。

抗干扰性能。

2.2 控制目标与性能指标

系统设计需实现三方面目标：高精度、高响应与高可靠性。精度方面，要求运动定位误差 $\leq \pm 0.02 \text{ mm}$ ，重复定位精度 $\leq \pm 0.01 \text{ mm}$ ；响应性能要求激光功率与运动速度实时匹配，延迟小于 5 ms ；可靠性方面需具备过流保护、温度报警及电源冗余机制，以保障设备连续稳定运行。为满足柔性布料切割特性，系统采用可变速恒功率控制策略，依据布料厚度与反射率动态调整激光输出，实现切割边缘平滑无焦糊。

2.3 电气系统信号流程与工作原理

系统工作时，主控 PLC 根据上位机下发的 G 代码解析出路径指令，经运动控制卡进行插补计算，输出脉冲信号驱动 X、Y 双轴伺服电机运行。激光控制单元实时接收功率设定信号，通过模拟量控制模块调节激光器输出强度。传感器反馈信号（位置、温度、光强等）经 A/D 转换后送入控制系统进行闭环调整，实现“速度—功率—位置”三维动态协调。整套系统采用实时多任务调度机制，使切割机在高速度运动中仍保持功率同步与精度稳定^[2]。

3 伺服驱动系统设计与运动控制策略

3.1 伺服系统的结构与控制原理

布料激光切割机的高精度运动依赖于伺服系统的精准控制。系统通常采用 X、Y 双轴伺服结构，由 AC 伺服电机配合高精度滚珠丝杠或直线电机执行驱动任务，形成高响应、高稳定的运动执行机构。伺服驱动器内部集成多环控制结构，包括电流环、速度环与位置环，通过“内电流、中速度、外位置”的三级闭环控制实现高精度动态跟踪。电流环以快速响应电机电磁转矩变化，速度环控制电机转速平稳，位置环则确保指令轨迹与实际运动轨迹的高度一致。为进一步提升动态性能，系统在传统 PID 控制基础上引入前馈补偿机制，通过对指令速度与加速度的预测性补偿，显著降低滞后误差。编码器实时输出高分辨率位移信号，经由运动控制卡处理反馈形成高精度闭环。实验表明，该复合控制结构可将定位误差控制在 $\pm 0.012 \text{ mm}$ 以内，系统动态响应时间缩短 25%，满足布料柔性切割过程中对高速度与高精度的双重要求。

3.2 运动控制算法优化

在布料激光切割中，运动轨迹的平滑性直接影响切割质量与边缘完整性。为此，控制系统采用 S 型加减速算法与前瞻路径优化技术，以实现平滑的速度过渡与稳定的轨迹控制。S 型加减速算法在加速与减速阶段引入“速度曲率连续性”约束，减少伺服系统机械冲击，防止布料在启动或转弯时产生抖动与位移误差。运动控制卡通过实时采样电机转速与位置反馈数据，结合模糊自适应控制算法，根据布料厚度、激光功率及路径曲率动态调整速度曲线，实现“速度随

形、功率匹配”的协调控制。前瞻算法则通过路径规划提前计算未来运动段的速度与加速度指令，确保系统在高速切割时仍能保持稳定输出。测试结果显示，该优化策略使路径跟随误差下降 18%，振动抑制率提升 23%，显著提高了切割边缘的光滑度与形状一致性^[3]。

3.3 多轴协同与误差补偿机制

布料激光切割机多采用龙门式双驱结构，当两侧伺服电机运动不同步时，极易造成横梁扭曲或路径偏差，影响切割精度。为解决这一问题，系统设计了主从同步控制机制。主轴伺服系统作为控制中心输出速度指令，从轴通过相位比较器接收主轴位置反馈，实现实时同步修正。系统利用双编码器反馈技术对两轴的位移与相位误差进行检测，并采用基于前馈补偿的同步误差校正算法，对伺服滞后和机械偏移进行动态修正。该算法通过建立误差状态方程，预测同步偏差趋势，并实时调整伺服驱动输出，实现高精度同步运行。为进一步提升稳定性，系统在高速运动状态下引入自学习补偿模块，对历史误差进行统计建模与优化更新。实验数据显示，该协同控制策略将双轴同步误差控制在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 以内，大幅提升了大幅面切割时的轮廓精度与重复性。系统运行稳定、响应迅速，保证了设备在复杂布料图形下的高质量切割效果。

4 激光功率控制与信号调节系统

4.1 激光功率控制原理

激光功率控制是布料激光切割机电气系统中的关键环节，其稳定性直接决定切割精度与表面质量。由于激光切割过程受功率密度、运动速度及焦点位置三者的耦合影响，本文设计了一种基于闭环反馈的激光功率自适应控制系统。系统通过光电探测器实时监测激光输出功率，将反馈信号输入主控 PLC，经 PID 控制算法与运动速度参数联动，实现动态功率调节。激光驱动模块支持 PWM（脉宽调制）与 0-10V 模拟量双通道输入，实现 0-100% 范围内的线性调节精度。该系统在路径拐角、速度变化或局部加速段能自动降低功率输出，以防止材料边缘烧焦或过度熔蚀，切割过程中功率波动控制在 $\pm 2.5\%$ 以内。实验表明，采用该闭环控制后，布料切割断面光滑度提升 18%，边缘热变形区域缩小 20%，显著改善了切割质量与一致性，为系统的高精度控制提供了技术支撑。

4.2 温度与能量控制机制

激光器在持续高功率运行下会出现热漂移现象，导致输出功率波动及光束能量分布不均。为此，系统构建了基于 NTC 热敏电阻的温度反馈控制回路，并与水冷循环系统实现闭环联动。控制模块实时采集激光腔体温度信号，经 A/D 转换后送入主控 PLC，通过 PWM 信号调节冷却泵转速与冷却液流量，使激光腔温度保持在设定范围内，温度波动控制在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内。系统同时集成能量积分模块，对激光输出