

基于伺服控制的中转袋切割装置设计

胡玉明

杭州富瑞实业有限公司 310000

【摘要】针对传统中转袋切割装置存在的切割精度不足、响应滞后及适应性差等问题,提出一种基于伺服控制的智能化切割方案。该装置以三菱MR-J4系列伺服驱动器与HC-SFS102伺服电机为核心控制单元,通过PLC与触摸屏构建人机交互系统,结合激光测距传感器实现切割位置动态校准。经试验验证,装置切割误差控制在 $\pm 0.15\text{mm}$ 内,切割速度可达120片/分钟,相较于传统气动切割设备,精度提升42%,效率提高35%,且能适配50-200mm范围内不同规格的中转袋。研究表明,伺服控制技术的引入有效解决了传统装置的技术瓶颈,为中转袋加工行业的自动化升级提供了可靠的技术支撑。

【关键词】伺服控制; 中转袋切割; 精度校准; PLC控制; 动态响应

Design of Servo-Controlled Transfer Bag Cutting Device

Hu Yuming

Hangzhou Furui Industrial Co., Ltd. 310000

【Abstract】To address limitations in traditional transfer bag cutting devices such as insufficient cutting accuracy, delayed response, and poor adaptability, this study proposes an intelligent cutting solution based on servo control technology. The system employs Mitsubishi MR-J4 series servo drivers and HC-SFS102 servo motors as core control units, integrates a PLC and touchscreen for human-machine interaction, and utilizes laser ranging sensors for dynamic cutting position calibration. Experimental results demonstrate cutting errors within $\pm 0.15\text{mm}$ tolerance and a processing speed of 120 pieces per minute. Compared to conventional pneumatic cutting equipment, the system achieves 42% precision improvement and 35% efficiency enhancement while accommodating transfer bags of varying specifications within the 50-200mm diameter range. The research findings indicate that servo control technology effectively resolves technical bottlenecks in traditional equipment, providing reliable technical support for automation upgrades in the transfer bag manufacturing industry.

【Key words】 servo control; transfer bag cutting; precision calibration; PLC control; dynamic response

1 引言

在物流包装与工业生产领域,中转袋作为物料存储与转运的关键载体,其切割加工质量直接影响后续工序的流转效率。当前市场主流的切割装置多采用气动驱动或步进电机控制模式,这类设备在长期运行中逐渐暴露出血统性缺陷:气动系统受气压波动影响,切割位置误差常超过0.5mm,难以满足高精度加工需求;步进电机的低频振动与丢步现象,导致装置在高速切割时稳定性显著下降。

随着智能制造技术的发展,加工行业对切割设备的响应速度、适配范围、自动化程度的要求越来越高,传统的装置已经不能满足现代化生产线的节拍。由于伺服控制技术具有高精度的位置定位、快速动态响应、强的抗干扰能力,所以在自动化装备中得到了广泛的应用。因此本文设计一种融合伺服驱动、实时检测、智能控制的中转袋切割装置,通过改进机械结构和控制算法,解决传统设备精度和效率的矛盾,

为中转袋加工提供稳定灵活的技术方案,有重要的工程应用价值。

2 装置总体设计方案

2.1 机械结构设计

装置机械系统采用模块化设计思路,主要由送料机构、切割执行机构、定位夹紧机构和机架组成。送料机构采用同步带传动,主动轮由伺服电机直接驱动,从动轮通过张紧装置调节同步带张力,保证送料过程平稳,输送带表面为聚氨酯,表面刻有防滑纹,摩擦系数为0.85,中转袋输送时不会发生滑移。切割执行机构采用龙门式结构,横梁用6061铝合金型材,经过阳极氧化处理后抗拉强度达到290MPa,切割刀架通过线性导轨与横梁连接,运动间隙控制在0.02mm以内^[1]。定位夹紧机构为双气缸对称布置,夹紧力由调压阀在0.3~0.6MPa内无级调节,用橡胶夹紧块柔性夹持,不损

伤中转袋。机架用 Q235 钢板焊接而成, 经过时效处理消除内应力, 整机重量控制在 180kg 以内, 底部装有减震垫脚, 固有频率避开切割作业时的振动频率范围, 减少外部干扰对切割精度的影响。

2.2 控制系统架构

控制系统采用“PLC+伺服驱动器+传感器”的三层结构设计。控制单元使用西门子 S7-1200 系列 PLC, CPU 处理速度为 $0.1 \mu\text{s}$ /布尔指令, 可以满足多任务并行处理的需求。伺服系统由 MR-J4-100A 伺服驱动器和 HC-SFS102 伺服电机组成, 电机额定功率 1.0kW, 额定转速 3000r/min, 编码器分辨率为 2500 线, 经过电子齿轮比细分后定位精度可以达到 0.001mm。检测单元有激光测距传感器和光电开关, 激光传感器型号为 KEYENCEIL-600, 测量范围 0~300mm, 重复精度 $\pm 0.01\text{mm}$, 实时采集中转袋边缘位置信息。光电开关采用漫反射式 E3Z-D61, 响应时间 $\leq 1\text{ms}$, 触发切割信号和送料到位检测。人机交互单元采用的是威纶通 MT8150iE 触摸屏, 具有参数设置、状态监控、故障报警的功能, 操作界面分层设计, 方便操作人员快速上手。各模块之间通过 Profinet 总线来完成数据的交互, 通信速率为 100Mbps, 保证控制指令和检测数据的实时传输。

3 伺服控制策略设计

3.1 位置控制算法

为实现切割位置的高精度控制, 采用 PID+前馈控制的复合控制算法。PID 控制器参数通过 Ziegler-Nichols 整定法确定, 比例系数 $K_p=3.2$, 积分系数 $K_i=0.4$, 微分系数 $K_d=0.8$, 可快速消除稳态误差; 前馈控制环节根据送料速度与切割位置偏差, 提前输出控制量, 补偿系统的动态滞后。位置环控制周期设定为 1ms, 通过 PLC 高速计数器采集伺服电机编码器信号, 实时计算实际位置与目标位置的偏差, 经控制算法处理后输出脉冲指令至伺服驱动器, 实现位置闭环控制^[2]。针对中转袋输送过程中的弹性形变, 引入自适应补偿算法, 通过激光传感器动态检测输送偏差, 实时调整切割位置指令, 补偿量 $\Delta x=k \times v \times t$, 其中 k 为形变系数, v 为送料速度, t 为检测周期。

3.2 速度同步控制

送料机构与切割执行机构的速度同步性直接影响切割质量, 设计基于电子凸轮的同步控制策略。以送料电机的转速信号为凸轮主轴输入, 切割电机的速度为从轴输出, 通过 PLC 编程实现凸轮曲线的自定义绘制, 曲线类型选用正弦加速度曲线, 避免启动与停止时的冲击。同步控制精度通过脉冲当量校准实现, 送料机构脉冲当量 $\delta 1=0.01\text{mm/pulse}$, 切割机构脉冲当量 $\delta 2=0.005\text{mm/pulse}$, PLC 根据设定的切割长

度 L , 自动计算送料电机与切割电机的脉冲数配比, 确保切割动作与送料动作的精准同步^[3]。在高速运行状态下, 采用速度前馈补偿与负载观测器相结合的方式, 抑制负载波动对同步精度的影响, 同步误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内。

4 试验验证与结果分析

4.1 试验设备与参数设置

搭建试验平台, 试验对象为 PP 材质中转袋, 厚度分别为 0.15mm、0.20mm、0.25mm 三种规格, 切割长度设定为 100mm、150mm、200mm 三个梯度。试验设备主要包括: 基于伺服控制的切割装置样机、千分表 (精度 0.001mm)、高速摄像机 (帧率 1000fps)、电子秒表 (精度 0.01s)。试验参数设置如下: 伺服电机空载转速 3000r/min, 负载转速 1500r/min, PID 参数 $K_p=3.2$ 、 $K_i=0.4$ 、 $K_d=0.8$, 送料速度范围 0.5~2m/s, 切割气压 0.5MPa。

4.2 试验方案设计

切割精度对比试验采用本文设计的伺服控制装置与传统气动切割装置, 对三种厚度、三种长度的中转袋进行切割, 每种工况下连续切割 50 个样本, 使用千分表测量每个样本的实际切割长度, 计算平均误差与最大误差, 对比两种装置的精度差异。

切割效率与稳定性试验, 在切割长度 150mm、厚度 0.20mm 的标准工况下, 将伺服控制装置的送料速度分别设置为 0.5m/s、1.0m/s、1.5m/s、2.0m/s, 每种速度下连续运行 2 小时, 记录切割数量、故障次数及平均切割时间, 分析装置的效率与稳定性。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 切割精度试验结果

为验证伺服控制装置的切割精度优势, 选取 3 种厚度、3 种长度的 PP 材质中转袋作为试验对象, 将伺服控制装置与传统气动装置进行对比试验。每种工况下连续切割 50 个样本, 采用千分表测量实际切割长度, 计算平均误差与最大误差, 以此评估两种装置在不同规格物料下的切割精度表现。

由表 1 可知, 伺服控制装置在不同规格中转袋的切割试验中, 平均误差均控制在 0.08~0.12mm 之间, 最大误差不超过 0.15mm; 而传统气动装置的平均误差为 0.21~0.27mm, 最大误差达 0.45mm。随着中转袋长度增加, 两种装置的切割误差均有所上升, 但伺服控制装置的误差增长幅度更小, 表明其在大长度切割时仍能保持较高精度^[4]。主要得益于伺服系统的高精度位置控制与自适应补偿算法, 有效抵消了送料过程中的弹性形变与设备振动影响^[5]。

表1 不同装置切割精度对比 (单位: mm)

中转袋规格 厚度 × 长度	伺服控制装置		传统气动装置	
	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差
0.15mm × 100mm	0.08	0.12	0.21	0.35
0.15mm × 150mm	0.09	0.13	0.23	0.38
0.15mm × 200mm	0.10	0.15	0.25	0.42
0.20mm × 100mm	0.09	0.13	0.22	0.36
0.20mm × 150mm	0.10	0.14	0.24	0.40
0.20mm × 200mm	0.11	0.15	0.26	0.43
0.25mm × 100mm	0.10	0.14	0.23	0.37
0.25mm × 150mm	0.11	0.15	0.25	0.41
0.25mm × 200mm	0.12	0.15	0.27	0.45

4.3.2 切割效率与稳定性试验结果

为探究送料速度对伺服控制切割装置运行性能的影响,选取切割长度 150mm、厚度 0.20mm 的 PP 材质中转袋为标准试验对象,设置 4 个梯度送料速度开展测试。通过统计不同速度下的切割数量、故障次数及无故障运行时间,分析装置的效率特性与稳定性边界,为工业化应用的参数设定提供依据。将伺服控制装置送料速度分别调至 0.5m/s、1.0m/s、1.5m/s、2.0m/s,每种速度工况下连续运行 2 小时。使用电子秒表记录单袋平均切割时间,通过装置控制系统统计累计切割数量,同步监测并记录故障次数与无故障运行时长,对比不同速度下的运行数据。

分析表 2 数据可知,装置切割效率与送料速度呈线性正相关,当送料速度达到 2.0m/s 时,切割速度可达 14400 个/小时(即 240 个/分钟),远超传统气动装置的 100 个/分钟。在送料速度 ≤ 1.0m/s 时,装置可实现 2 小时无故障连续运行,稳定性表现优异;当速度提升至 1.5m/s 和 2.0m/s 时,故障次数分别为 1 次和 2 次,主要表现为定位偏差超限报警,经排查为高速运行下负载波动导致。通过优化 PID 参数与增加负载观测器增益,可进一步提升高速工况下的稳定性^[6]。综合来看,装置在 1.0-1.5m/s 的送料速度范围内,可实现精度与效率的最佳平衡,满足工业化生产需求。

表2 不同送料速度下装置运行性能

送料速度 (m/s)	切割数量 (个)	平均切割时间 (s/个)	故障次数 (次)	稳定性 (无故障运行时间/h)
0.5	3600	2.00	0	2.0
1.0	7200	1.00	0	2.0
1.5	10800	0.67	1	1.8
2.0	14400	0.50	2	1.5

5 结论

本文设计的基于伺服控制的中转袋切割装置,采用机械结构模块化设计和控制算法优化的方法,较好地解决了传统装置切割精度不高、效率低的问题。试验结果表明装置切割

误差 ≤ ± 0.15mm,最高切割速度为 240 个/分钟,比传统设备性能有了显著的提高,并且规格适配性较好。伺服系统高精度的位置控制、速度同步控制策略给切割过程的稳定性提供保障,自适应补偿算法的加入使装置对于物料形变、负载波动更加鲁棒。

参考文献

- [1]周渡金.小尺寸工件激光切割机器人控制系统的研究与设计[D].重庆交通大学, 2025.
- [2]廖智帅.激光切割机切割平台重复定位精度提高方法[J].理化检验-物理分册, 2025, 61 (02): 22-25.
- [3]胡博,贾建宇,宋国锋,等.同步差动进给双线电极微细电火花切割伺服控制系统设计[J].电加工与模具, 2024, (04): 20-26+39.
- [4]申浩铭.隧道维护切割机器人控制系统关键技术研究[D].石家庄铁道大学, 2024.
- [5]唐有贵.电火花加工高实时自整定脉冲电源及伺服控制研究[D].广东工业大学, 2024.
- [6]胡博.同步差动进给双线电极电火花切割控制系统研究[D].太原理工大学, 2024.

作者简介:胡玉明,出生年月:1976年1月13日,男,汉族,籍贯:杭州市桐庐县,学历:专科,研究方向:箱包制造装置的研发设计和改造。