

口罩熔喷布裁剪装置的精度控制与自动化流程优化

陈利锐

杭州蓝奥科技有限公司 浙江 杭州 310051

【摘要】本文围绕口罩熔喷布裁剪装置在实际生产中存在的精度不足、效率低下及自动化程度不高等问题，开展精度控制与自动化流程优化研究。通过机械结构优化、传感器技术与控制算法的综合应用，提出了一套完整的裁剪装置精度提升与自动化改造方案。在硬件方面，改进了传动机构、刀具系统和布料定位装置，显著提高了裁剪精度和稳定性；在控制层面，引入了高精度伺服电机、视觉定位系统和自适应裁切算法，实现了裁切路径的智能规划与实时补偿。系统集成后，通过实验验证，裁剪精度误差控制在±0.15mm以内，裁切速度达到120片/分钟，设备连续运行稳定性显著提升。本研究为口罩生产设备的高精度、高自动化升级提供了理论依据和技术支持。

【关键词】口罩生产；熔喷布裁剪；精度控制；自动化流程；伺服系统；视觉定位

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.011

1 引言

随着全球公共卫生事件的频发和民众健康意识的增强，口罩作为重要的防护用品，其市场需求持续增长，熔喷布作为口罩的核心过滤层，其裁剪质量直接关系到口罩的防护效果和使用体验。目前，市场上多数口罩生产设备在熔喷布裁剪环节仍存在精度不高、效率低下、自动化程度不足等问题，难以满足高质量大规模生产的需求。

现有裁剪设备多采用机械传动配合简易刀模的结构，由于传动间隙、布料张力不均、刀具磨损等因素，导致裁切尺寸一致性差，边缘毛糙，甚至出现分层、拉丝等现象。此外，传统设备大多依赖人工上料、对位和收料，不仅效率低，还容易因操作误差影响产品质量。随着工业自动化与智能制造的推进，实现口罩熔喷布裁剪的高精度、全自动化已成为行业发展的必然趋势。

在裁剪控制技术方面，目前研究主要集中在伺服电机控制、机器视觉定位和运动规划算法等领域。伺服系统可实现高精度位置控制，但在多轴协同和动态响应方面仍有优化空间；视觉定位技术能够实时检测布料位置和形态，然而在高速运动下的图像处理精度和实时性仍需提升；运动规划算法方面，尽管已有多种插补和轨迹优化方法，但在复杂形状裁剪和自适应调整方面的应用还不够成熟。

本文针对上述问题，系统研究口罩熔喷布裁剪装置的精度控制与自动化流程优化方法，重点从机械结构、控制系统、裁切算法和系统集成四个层面展开，旨在构建一套高精度、高效率、高稳定性的裁剪系统，为口罩生产设备的升级与技术发展提供参考。

2 裁剪装置结构与精度控制设计

2.1 总体结构设计

口罩熔喷布裁剪装置采用模块化设计思路，主要包括放料模块、牵引定位模块、裁切执行模块和收料模块四大核心部分。

放料模块负责熔喷布卷材的平稳输出，配备张力传感器和纠偏机构，确保布料在进入裁切区域前保持平整与对中。牵引定位模块采用伺服电机驱动精密滚珠丝杠，实现布料的间歇式进给，定位精度可达±0.1mm。裁切执行模块由刀架、驱动气缸与直线导轨组成，支持多种刀模的快速更换。收料模块通过真空吸附方式实现成品的自动分离与堆叠，避免人工干预带来的污染与误差。

装置主体结构采用铝合金型材与钢板焊接组合，兼顾刚性与轻量化需求，外壳进行密封设计，防止布屑与灰尘进入影响传动精度。整机尺寸根据主流口罩生产线布局进行优化，便于集成与扩展。各模块之间通过总线通信实现数据交互，确保动作协调一致。在结构布局上充分考虑维护便利性，关键部件采用快拆设计，缩短设备保养与故障处理时间。

2.2 传动系统与精度保障

传动系统是影响裁剪精度的关键因素，本研究采用伺服电机配合行星减速机的驱动方案，通过高分辨率编码器实现闭环控制，避免传统步进电机存在的丢步与累积误差问题。在关键运动节点使用直线导轨与滑块组合，减小摩擦与间隙，提高运动平稳性。

为进一步消除传动误差，在刀架运动机构中引入弹性补偿装置，能够根据刀具磨损情况自动调整切深，保证裁切力恒定。同时，在布料进给路径上设置多个光电传感器，实时检测布料位置与张力变化，并通过PLC进行动态调整，确保每一次裁切都在设定位置完成。系统还配备温度补偿功能，根据环境温度变化自动修正传动参数，减少热变形对精度的影响。

在长期运行稳定性方面，对关键传动部件进行特殊表面处理，提高耐磨性与抗疲劳强度，定期自动润滑系统确保导轨与丝杠始终保持良好工作状态，通过上述措施，系统在连续运行条件下仍能保持较高的精度稳定性，有效延长设备使用寿命。

2.3 视觉定位与对位系统

为提高裁切位置准确性,系统集成了一套基于工业相机的视觉定位系统,相机安装在裁切区域上方,拍摄布料表面的标记点或边缘特征,通过图像处理算法计算实际位置与理论位置的偏差,并将修正指令发送给运动控制器。视觉系统采用高频LED光源,避免环境光干扰,确保图像采集稳定性。

图像处理算法基于灰度匹配与边缘检测,能够在布料轻微褶皱或偏移的情况下仍准确识别对位点,系统响应时间低于50ms,满足高速连续生产的要求。为进一步提高定位精度,系统采用多特征点融合定位策略,通过分析多个标记点的位置关系,综合计算布料的位置与姿态,有效克服单一特征点易受干扰的问题。

视觉系统还具备自学习功能,能够根据历史数据优化识别参数,适应不同批次布料的特性变化,系统定期进行标定校正,确保长期使用中的定位精度不漂移。通过与运动控制系统的深度集成,实现“检测-计算-校正”一体化的高精度对位流程,为高质量裁剪提供可靠保障。

3 裁切控制与自动化流程优化

3.1 裁切路径规划与控制策略

裁切路径的合理规划直接影响裁切质量与设备寿命,本研究开发了一种基于运动学模型的动态路径规划方法,根据刀模形状与布料特性实时计算最优裁切轨迹。在直线与圆弧插补基础上,引入平滑过渡算法,避免刀具在拐点处产生冲击与振动。路径规划还考虑刀具切入切出角度,优化裁切顺序,减少材料变形与应力集中。

控制策略方面,采用多轴协同控制技术,实现刀架与送料机构的同步运动,在每一次裁切循环中,系统自动检测布料状态与刀具位置,动态调整裁切速度与压力,确保在不同材质与层数情况下仍能保持切口平整、无毛边。针对多层熔喷布裁切,系统采用渐进式加压策略,避免层间滑动导致的尺寸偏差。

系统还开发了自适应裁切参数调整功能,根据实时监测的裁切力与声音特征,判断刀具锋利度与裁切质量,自动调整裁切参数或提示换刀。智能预警机制可在刀具磨损达到临界值前提前报警,避免因刀具问题导致批量质量事故。

3.2 自动化流程设计与集成

为实现从放料到收料的全流程自动化,系统构建了集中控制架构,以PLC为主控制器,协调各模块动作,在上料环节,采用气动顶针与伺服展布装置配合,实现卷料的自动装夹与初张力控制。在裁切过程中,通过实时监测布料余量与设备状态,自动判断是否需要换料或停机维护。

收料环节设计了一套基于机器视觉的品检机制,对裁切完成的口罩片进行外观检测,自动剔除不合格产品,合格品通过

传送带送入堆叠机构,按设定数量自动成组并输出。整线运行数据上传至MES系统,实现生产过程的透明化管理,系统支持订单信息导入,可根据不同订单要求自动调整生产参数,实现柔性化生产。

物料流与信息流的高度集成是自动化系统的核心特点,系统通过RFID技术识别物料卷信息,自动调用对应裁切方案。生产过程中实时采集设备状态、产量、质量等数据,生成生产报表与设备效率分析。当出现异常情况时,系统自动执行预设处理流程,最大限度减少人工干预,确保生产连续性与稳定性。

3.3 人机交互与故障诊断

系统配备触摸屏作为人机交互界面,提供参数设置、运行监控、产量统计与故障报警等功能,操作人员可通过界面快速切换产品规格,调整裁切参数,查看设备状态。界面设计采用图形化与分层菜单结合的方式,重要参数与状态一目了然,同时支持高级设置的密码保护,防止误操作。

系统内置故障诊断模块,能够根据传感器数据与运行日志自动识别常见故障类型,如刀具堵塞、布料断裂、定位偏差等,并给出处理建议,大幅降低设备维护难度与停机时间。智能诊断系统采用案例推理与规则推理相结合的方法,通过分析历史故障数据与当前症状,提供精准的故障定位与解决方案。

为提升系统可用性,开发了远程监控与维护功能,通过以太网或无线网络连接,工程师可远程访问设备状态,进行参数调整与程序更新。系统自动记录运行数据与故障信息,形成设备健康档案,为预防性维护提供数据支持。通过这些功能的集成,大幅提升了设备的智能化水平与用户体验。

4 系统实现与性能测试

4.1 系统集成与调试

将优化后的机械结构、传感系统与控制算法进行集成,构建完整的口罩熔喷布裁剪系统。控制系统采用嵌入式工控机与PLC组合架构,工控机负责视觉处理与运动规划,PLC负责逻辑控制与实时调度。系统支持以太网通信,可与上层管理系统进行数据交互。

在调试阶段,重点对各模块的协同时序进行优化,确保放料、定位、裁切、收料等动作无缝衔接。通过对伺服参数、视觉参数与裁切参数的反复整定,使系统在高速运行下仍保持稳定。系统集成过程中,特别关注电磁兼容性与信号完整性,采取屏蔽、接地、滤波等措施,确保在工业环境下的可靠运行。

为验证系统性能,进行了多轮试运行与参数优化,试运行涵盖不同规格的熔喷布材料,从单层到多层,从普通口罩到KN95口罩,全面测试系统的适应性与稳定性。通过试运行中发现的问题,对机械结构、控制算法与人机界面进行持续改进,最终形成稳定可靠的系统版本。

4.2 性能测试与分析

为全面评估系统性能,从裁剪精度、生产效率、稳定性三个维度进行测试,精度测试采用激光位移传感器与影像测量仪,对裁切成品进行尺寸检测。测试结果显示,在连续生产条件下,裁切长度误差控制在±0.15mm以内,宽度误差在±0.1mm以内,切口平整无毛刺。

效率测试表明,系统最高裁切速度可达120片/分钟,较传统设备提升50%以上,在8小时连续运行测试中,设备故障率为0.5%,表现出良好的稳定性。此外,系统换型时间短于3分钟,适应多品种、小批量的柔性生产需求。能耗测试显示,优化后的系统比传统设备节能20%以上,符合绿色制造要求。

为进一步验证系统可靠性,进行了极限条件测试,包括连续72小时不间断运行、不同环境温湿度测试、电压波动测试等。在所有测试条件下,系统均保持稳定运行,产品质量一致性好。通过这些严格测试,验证了系统在各种工况下的可靠性与适应性,为实际应用提供了充分保障。

5 技术优势与应用价值

本文所研究的口罩熔喷布裁剪系统具有精度高、速度快、自动化程度高等特点,能够有效提升口罩生产的质量与效率,降低对人力的依赖,系统具备良好的可扩展性,可通过更换刀模与调整参数适应不同型号口罩的生产需求,具有较强的市场适应性。与传统设备相比,本系统在裁切精度、生产效率和稳定性方面均有显著提升。

在应用价值方面,该系统不仅适用于平面口罩熔喷布的裁

切,还可推广至KN95口罩、防护服等其它医疗防护材料的分切与成型环节,具有广泛的应用前景。对于口罩生产企业而言,系统的投入可大幅提升产品质量一致性,降低不良品率,同时减少对熟练操作工的依赖,具有良好的经济效益。

从行业发展角度看,本系统的成功开发为医疗防护制品生产设备的升级换代提供了技术示范,推动行业向智能化、自动化方向发展。系统的模块化设计理念与开放性架构也为后续功能扩展与技术升级预留了空间,具有良好的可持续发展性。

6 结论

本文围绕口罩熔喷布裁剪装置的精度控制与自动化流程优化展开系统研究,在机械结构、控制系统、裁切算法与系统集成等方面取得了一系列成果。通过传动系统优化与视觉定位技术的引入,显著提升了裁切精度与稳定性;通过自动化流程设计与智能控制策略的实施,实现了从放料到收料的全流程自动化。

测试结果表明,优化后的系统裁切精度误差控制在±0.15mm以内,生产效率达到120片/分钟,设备运行稳定可靠。系统具备良好的柔性生产能力,可快速适应不同产品的生产需求。智能化故障诊断与远程监控功能大幅提升了设备可维护性与用户体验。

本研究为口罩生产设备的高精度、高自动化升级提供了可行的技术方案,对推动医疗防护制品行业的智能制造发展具有积极意义。未来,随着技术的不断进步与应用需求的深化,口罩熔喷布裁剪设备将朝着更加智能、高效、绿色的方向持续发展,为提升公共卫生防护物资的生产水平做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 董林威.柔性垫层裁剪装置控制系统研究[D].西南交通大学,2023.
- [2] 程荣,赵晓晴,王凯,等.基于机器视觉的纸张裁切设备高精度定位算法研究[J].造纸科学与技术,2025,44(06):112-115.
- [3] 林元熙.柔性材料裁剪机自动换刀装置的设计与研究[D].福建农林大学,2023.
- [4] 林元熙.柔性材料裁剪机自动换刀装置的设计与研究[D].福建农林大学,2023.