

基于翻转定位与三轴联动喷洗的周转箱全自动清洗系统设计与应用

马麒胜 李柏禹 李 多 班玉洋

吉林烟草工业有限责任公司长春卷烟厂 吉林 长春 130000

摘要:烟草制丝车间中,用于烟包转运的大型周转箱因长期处于高压高湿环境,内外表面易附着烟叶残渣、烟油并滋生细菌,影响烟丝品质。传统人工清洗方式效率低、劳动强度大、安全风险高、清洗不彻底且水资源浪费严重。为此,本文设计了一套集“机械翻转定位”与“三轴联动喷洗”于一体的周转箱全自动清洗系统。该系统含翻转定位和三轴联动喷洗两大核心子系统,前者实现周转箱自动输送、精准夹持与180°翻转,利于污垢脱落并为后续喷洗创造理想姿态;后者构建空间直角坐标系,模拟优化人工清洗轨迹,确保内部复杂结构全覆盖清洗。系统集成PLC控制单元,实现两大子系统无缝协同。该系统可提升清洗效率与质量,降低成本与风险,节约水资源,为行业大型容器自动化清洗提供借鉴。

关键词:周转箱;全自动清洗;翻转定位;三轴联动;磁耦合无杆气缸;烟草制丝

引言

现代化烟草工业制丝生产线上,周转箱作为关键物流载体,承担烟包存储与转运任务。其体积庞大,常在高温、高湿、多粉尘环境循环使用,烟叶碎屑、烟油及微生物易在箱体内外积聚成顽固污垢。若不及时彻底清洁,这些污染物会交叉污染后续烟丝,影响纯净度、香气与口感,还可能滋生烟虫,威胁产品质量安全。因此,建立高效、可靠的周转箱清洗机制是保障烟草高品质生产的必要前提。但当前多数烟草企业依赖传统人工清洗,需5至6人协同,借助工具手动冲洗擦拭,存在效率低、劳动强度大、安全风险高、清洗质量不稳定、资源浪费严重等痛点^[1]。面对这些挑战,开发能替代人工作业、实现全流程自动化智能化的周转箱清洗系统,成为烟草行业提质增效、降本增安的迫切需求,能为高端烟丝稳定生产提供坚实后勤保障。

1 系统总体方案设计

为实现对大型周转箱的高效、彻底、安全清洗,本文设计的全自动清洗系统摒弃了单一技术路径的局限性,创造性地采用了“物理姿态重构+智能轨迹规划”的复合式解决方案。系统整体由翻转定位子系统和三轴联动喷洗子系统两大功能模块组成,并通过统一的电气控制系统实现无缝集成。

1.1 总体工作流程

整个清洗作业流程可分为以下几个阶段:(1)上料与输送:是从现有运输轨道上由操作人员通过屏幕选择清洗模式,周转箱自动运行至清洗轨道。(2)自动定位

与夹持:系统通过滚筒输送将周转箱运送至预定翻转工位,并通过活动抱夹机构对其进行精准、牢固的夹持定位。(3)110°翻转:在夹持状态下,翻转机构启动,将周转箱平稳地翻转110°,使其原本朝上的开口面朝下。此步骤至关重要,它利用重力作用使大部分松散污垢自然脱落,并为后续喷洗创造了最佳的受洗姿态——所有内表面均无障碍地暴露在喷嘴下方。(4)移位至清洗工位:翻转完成后,周转箱被移送至三轴联动喷洗子系统的正下方。(5)三轴联动程序化喷洗:喷洗子系统根据预设程序,驱动喷嘴在X(前后)、Y(左右)、Z(上下)三个方向上进行精确、有序的往复运动,对周转箱内部进行全覆盖、无死角的高压冲洗。(6)排水与下料:清洗完毕,废水经接水盆回收处理,周转箱被送至出口,完成一个清洗周期。

1.2 子系统功能划分

翻转定位子系统核心任务是解决“姿态问题”。通过机械化手段,安全、可靠地改变周转箱的空间姿态,将其从常规的“口朝上”状态转变为最适合内部清洗的“口朝下”状态。这不仅解决了重力排污的问题,更重要的是消除了因箱体侧壁遮挡而形成的清洗盲区。三轴联动喷洗子系统核心任务是解决“覆盖问题”。在周转箱处于最优清洗姿态的前提下,通过一个可在三维空间内自由移动的喷嘴,主动去“寻找”并“覆盖”箱体内的每一个角落,确保没有任何区域被遗漏。这是一种主动式的、自适应的清洗策略。两大子系统相辅相成,共同构成了一个逻辑严密、功能完备的自动化清洗闭环。

翻转定位为三轴喷洗创造了理想的前提条件，而三轴喷洗则充分利用了这一前提，将清洗效果推向极致。

2 翻转定位子系统设计

2.1 机械结构设计

如图1所示，翻转定位子系统的机械结构主要由传送带安装限位板（1）、滚筒（2）、翻转安装组件（4）及接水盆（7）等构成。限位板作为主体框架，通过底部的第一支撑脚座（17）确保整体稳定性；其上等间距布置的滚筒（2）形成输送平面，由第二驱动电机（16）经链条传动组件（18）驱动，实现周转箱在输送方向上的位置调整。系统核心为翻转安装组件（4），安装于连接

架（9）上方，由第一驱动电机（6）驱动转动轴（45）旋转，带动固定框（44）与支撑立板（15）同步转动，从而传递翻转力矩；安装横杆（11）与限位插销（13）分别对周转箱的一侧和顶部进行初步限位；抱夹机构则由第一、第二抱夹基板（41、42）构成主体，电动伸缩杆（47）通过多组转动卡箍（48、22、23）及传动杆（24）组成的连杆机构，驱动活动抱夹（20）完成开合动作，实现对周转箱两侧的牢固夹持。翻转工位下方设有接水盆（7），用于收集污垢与清洗废水，其内置限位导轨（8）可引导并支撑连接架的第二支撑脚座（19），保障翻转过程平稳可靠。

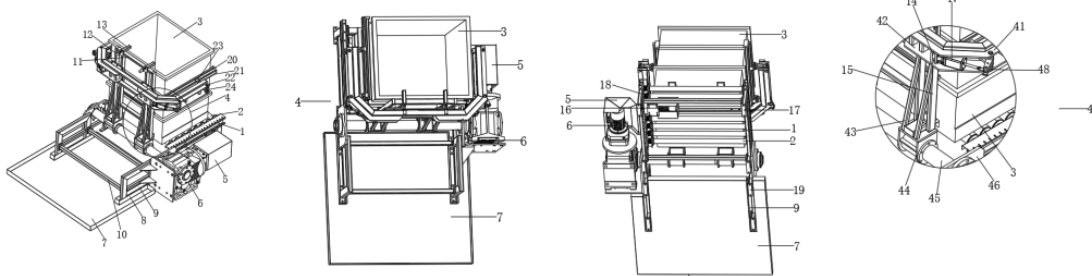


图1 翻转定位子系统

2.2 工作原理与关键技术

翻转定位子系统的工作过程高度集成机电一体化技术。操作员通过控制面板启动系统后，将周转箱（3）置于入口滚筒（2）上，第二驱动电机（16）随即驱动链条传动组件（18），带动滚筒将周转箱精准输送至翻转工位，完成由安装横杆（11）与限位插销（13）实现的粗定位。随后，电动伸缩杆（47）收缩，通过由多个转动卡箍和传动杆组成的连杆机构放大推力，驱动两侧活动抱夹（20）向内合拢，牢固夹紧箱体侧壁，底部限位隔板（21）同步提供辅助支撑^[2]。该抱夹机构具备微角度自适应能力，可应对箱体轻微变形或放置偏差，确保夹持均匀、避免损伤。夹紧完成后，第一驱动电机（6）启动，带动转动轴（45）及固定其上的支撑立板（15）与固定框（44）旋转，使周转箱平稳翻转180°，最终开口朝下落于支撑板（10）上，脱落污物与废水则被下方接水盆（7）收集。系统关键技术在于高可靠抱夹定位机构与“慢-快-慢”节奏的变频翻转控制，前者防止翻转中滑脱，后者兼顾效率与设备安全。

3 三轴联动喷洗子系统设计

3.1 机械结构与运动学原理

如图2所示，三轴联动喷洗子系统采用经典的笛卡尔坐标系布局，由X、Y、Z三个相互正交的磁耦合无杆气缸构成。Z轴（上下方向）由行程500mm的气缸（18）

实现，其滑台（20）通过固定支架（19、23）和背板（16）安装于整体框架上；Y轴（左右方向）同样采用500mm行程的气缸（12），其缸体经垫板（14）固定在可沿X轴移动的底板（10）上，滑台（11）带动Z轴组件横向移动；X轴（前后方向）则由行程1000mm的气缸（5）驱动，其滑台（7）承载整个Y-Z轴组件，实现前后运动。清洗喷嘴通过清洗钢管（27）、管夹（31）、支架（33）及底座（32）等部件集成于Z轴滑台上，借助三轴独立或协同运动，可在1000×500×500mm³的空间内精确定位任意清洗点。本设计选用磁耦合无杆气缸，其活塞与滑块间通过磁场耦合而非机械贯穿连接，不仅密封性优异、杜绝泄漏，适应潮湿多尘的清洗环境，而且结构紧凑，在同等行程下显著节省安装空间，提升了系统可靠性与集成度。

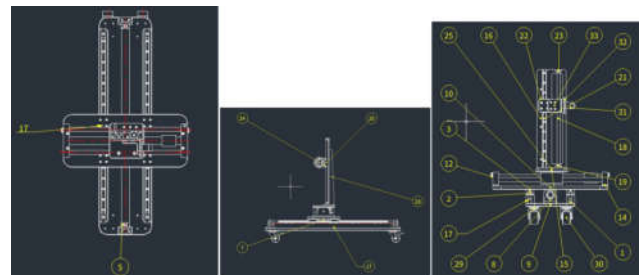


图2 三轴联动喷洗子系统

3.2 清洗策略与控制逻辑

本系统采用了一套分层、有序且重点强化的程序化清洗策略，以确保最佳清洗效果。当翻转定位子系统完成其作业并向控制系统发送“到位”信号后，清洗流程启动：首先X轴气缸带动喷嘴移动至周转箱前端，电磁阀开启进行初步冲洗；随后持续10秒喷水后，Y轴气缸驱动喷嘴开始左右线性扫描清洗；Y轴到位并延时10秒后，Z轴气缸将喷嘴上下移动预设步距（如50mm），然后反向进行Y轴扫描。通过不断重复上述Z轴和Y轴的动作，喷嘴以“之”字形路径逐层覆盖整个箱体高度方向。每当一个X位置的高度清洗完毕，X轴气缸会将喷嘴向前推进一个步距，并重复Y-Z扫描循环。在完成对箱体最末端的清洗后，电磁阀关闭停止喷水，X轴气缸再将喷嘴带回初始位置，准备下一次操作^[3]。这种清洗策略模拟了人工仔细擦拭的过程，确保清洗路径连续无遗漏，同时在各方向端点设置延时，加强边缘角落等易藏污区域的冲刷，有效解决了卫生死角问题。此方法不仅提升了清洁效率，还保证了高标准的清洁质量。

4 系统集成与控制

4.1 硬件集成

所有关键执行元件，包括翻转定位子系统的第一驱动电机、第二驱动电机、气缸伸缩杆，以及三轴联动喷洗子系统的三台磁耦合无杆气缸的电磁阀、各轴的接近开关（用于检测气缸行程终点）和喷嘴的电磁阀，均通过电气线路接入PLC的I/O模块。操作人员通过安装在翻转定位子系统外部的控制面板与PLC进行人机交互，实现一键启动、急停、手动调试等功能。

4.2 软件逻辑

PLC内部运行的控制程序是整个系统的大脑。其主程序逻辑严格遵循前述的总体工作流程。程序通过读取各传感器（如接近开关）的状态来判断各机构是否运行到位，并据此发出下一步的控制指令。例如，只有当翻转定位子系统的接近开关确认周转箱已翻转到位并落稳后，PLC才会向三轴喷洗子系统发送启动信号。同样，在喷洗子系统的流程图（图3）中，每一步动作的执行都以前一步的“到位信号”和“延时时器”为前提条件，形成了严谨的顺序控制逻辑。

5 应用效果分析与评估

本文提出的基于翻转定位与三轴联动喷洗的周转箱全自动清洗系统，预期在效率、质量、安全、成本及可持续性方面带来显著效益。首先，在清洗效率上实现了革命性的提升。该自动化系统通过程序化流程和高效的机械动作，极大缩短了单次清洗周期，提升了单位时

间内的清洗吞吐量，解决了物流瓶颈问题，支撑生产线高效运转。其次，清洗质量达到标准化与可靠性。人工清洗效果因人而异，存在波动性和不确定性，而全自动系统确保每次清洗严格遵循最优参数，消除人为因素干扰，提供洁净度一致、可靠的周转箱，保障最终产品质量。第三，作业安全性得到了根本改善。传统清洗环境恶劣且危险，全自动系统通过物理隔离和远程控制，将员工从高危环境中解放出来，降低了工伤事故率，改善了职业健康状况。第四，运营成本实现结构性优化。虽然初期设备投资较大，但全生命周期成本（LCC）经济效益可观，人力资源成本大幅降低，精准清洗减少资源浪费，并间接减少了产品返工损失。最后，该系统对可持续发展做出了积极贡献。其设计符合绿色制造理念，通过高效水利用和废水回收减少水资源消耗和污水排放，同时体现了以人为本的企业管理理念，是迈向绿色智能制造的重要步骤。这不仅是一次技术升级，更是企业社会责任感的体现。

6 结语

本文聚焦烟草制丝车间大型周转箱清洗的行业难题，成功研发并应用基于“翻转定位”与“三轴联动喷洗”技术的全自动清洗系统。该系统以创新复合式技术路线，有效攻克传统人工清洗效率低、强度大、风险高、质量差、浪费多等核心问题。主要结论表明，翻转定位技术是高效内部清洗前提，180°翻转利于排污且为无死角喷洗创造条件；三轴联动喷洗技术是保证清洗彻底性的核心，三坐标清洗平台结合“之”字形扫描策略可全面覆盖内部区域；系统集成与自动化控制是保障高效、安全、稳定运行的关键，基于PLC的控制系统实现一键式操作。该系统不仅为烟草行业提供先进装备方案，对其他行业类似大型容器自动化清洗也有借鉴意义。未来，可进行智能化升级引入机器视觉实现“按需清洗”，深化绿色化优化水循环和使用环保清洗剂，拓展柔性化提升设备通用性，为现代制造业高质量发展注入动力。

参考文献

- [1]邱耀德,杨军,胡长霆,等.成品烟丝周转箱清洁站系统设计与应用[J].今日制造与升级,2025,(10):47-49.
- [2]李秀芳,郑智毅,江豪.制丝生产线防滑带式输送机自动清洁装置设计[J].轻工学报,2021,36(06):86-90.
- [3]王普涛.烟草制丝线回潮筒自动清洗装置[J].机械工程与自动化,2022,(01):136-138+141.