

脉冲式残烟处理装置的电气系统设计

王子涵, 李鑫

红塔烟草(集团)有限责任公司, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月4日; 发布日期: 2026年6月11日

摘要

针对卷烟生产过程中细支残次烟支数量多、烟丝浪费严重, 以及传统人工烟丝回收方式效率低、成本高、烟丝纯净度差等问题, 本文设计了一套脉冲吹气式残烟处理装置的电气控制系统。该系统以倍福TWINCAT运动控制软件为核心, 协同电机、编码器、高速电磁阀、高速工业相机等元器件, 实现残次烟支的连续输送、方向识别、精准定位、脉冲吹气分离、视觉检测及不合格烟支剔除等功能。通过高精度编码器叠加四倍频技术提升控制精度, 解决气流传输延迟问题, 并通过与机械结构的协同调试优化分离效果。试验结果表明, 该系统在800支/分钟的处理速度下, 烟丝吹净率稳定达到95%以上, 仅需单人操作即可完成全流程作业, 有效节省人力资源成本, 且分离后的烟丝纯净度高、烟支杆结构完整, 满足规模化烟丝回收需求。最后, 针对编码器控制精度的固有局限, 提出将鼓轮驱动电机替换为伺服电机的优化方向, 为后续系统精度提升提供参考。

关键词

脉冲式, 残次烟支, 编码器, 电气零位, 移位寄存器

Design on Electrical System of Pulsed Residual Cigarette Disposal Equipment

Zihan Wang, Xin Li

Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: May 11, 2026; accepted: June 4, 2026; published: June 11, 2026

Abstract

Aiming at the problems of large quantity of defective slim cigarettes, serious tobacco waste in the cigarette production process, as well as low efficiency, high cost and poor purity of tobacco in the traditional manual tobacco recovery method, this paper designs an electrical control system for a pulse air-blowing defective cigarette processing device. Taking Beckhoff TWINCAT motion control

文章引用: 王子涵, 李鑫. 脉冲式残烟处理装置的电气系统设计[J]. 电路与系统, 2026, 15(2): 89-97.

DOI: 10.12677/ojcs.2026.15208

software as the core, the system cooperates with motors, encoders, high-speed solenoid valves, high-speed industrial cameras and other components to realize the functions of continuous conveying, direction identification, precise positioning, pulse air-blowing separation, visual inspection and rejection of unqualified cigarettes for defective cigarettes. The high-precision encoder combined with quadruple frequency technology is used to improve the control accuracy, solve the problem of air flow transmission delay, and optimize the separation effect through collaborative debugging with the mechanical structure. The test results show that the system can stably achieve a tobacco blowing rate of more than 95% at a processing speed of 800 cigarettes per minute, and only one person is required to complete the whole process operation, which effectively saves human resource costs. In addition, the separated tobacco has high purity and the cigarette rod has a complete structure, which meets the demand of large-scale tobacco recovery. Finally, in view of the inherent limitation of the control accuracy of the encoder, an optimization direction of replacing the drum drive motor with a servo motor is proposed, which provides a reference for the subsequent improvement of the system accuracy.

Keywords

Pulsed Type, Defective Cigarette Sticks, Encoder, Electrical Zero Position, Shift Register

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

卷烟生产过程中, 因重量、吸阻、圆周、空头、外观破损等问题, 卷接设备会产生大量残次烟支。近年来细支卷烟市场占比持续提升, 其烟支更细更长, 质量控制难度更大, 残次率显著高于常规烟支。残次烟支中烟丝成本占比超 95%, 高效烟丝回收已成为卷烟企业降本增效的关键环节。

传统残烟处理以人工划破烟支为主, 存在人力成本高、效率低、烟丝易混入纸屑与滤嘴纤维等缺陷。国内外学者围绕烟丝自动化回收开展大量研究: 赖征升讲述了倍福嵌入式 PC 应用于 Protos M5 卷接机电控系统的方法, 为高速烟支处理提供电控基础[1]; 孔令韬等设计爆珠烟支回收装置, 实现烟支定向输送与分离[2]; 黄卿即等研发 YF17 烟支自动排空装置, 实现了烟支的自动化输送[3]。现有技术多聚焦常规烟支或单一功能实现, 针对细支烟高速、高精度、高纯净度的脉冲吹气分离系统仍存在空白。

本文基于脉冲吹气原理, 设计适配细支残烟的自动化电气控制系统, 集成精准定位、时序补偿、视觉检测、智能剔除等功能, 解决人工回收痛点, 满足工业化高效回收需求。

2. 提出问题

2.1. 现有烟丝回收方法的局限性

目前, 对于卷烟机剔除的残次品烟支, 卷烟工厂采取的主流处理方法是: 将残次品烟支统一收集, 由专人通过划破烟支的方式分离烟丝和其他烟用材料。这样的处理方式主要有以下几个弊端:

- 1) 人力成本高: 残烟数量大, 人工处理耗时费力, 成本居高不下。
- 2) 烟丝纯净度低: 分离过程中卷烟纸碎屑、醋酸纤维混入烟丝, 影响再利用质量。
- 3) 效率与一致性差: 人工处理速度慢、标准不统一, 难以匹配生产线节拍。
- 4) 烟支杆破损率高: 外力撕扯易导致烟支杆断裂, 无法完整回收。

2.2. 设计参考

1) 脉冲式吹气分离烟丝与空烟杆。通过将压缩空气从烟支滤嘴端吹入。通过气压的作用, 将烟丝从卷烟纸端全部吹出, 达到烟丝分离的效果。

2) 通过带烟槽的鼓轮转动输送烟支。在鼓轮槽上检测烟支的方向、有无, 并在特定的工位进行吹丝动作。

3) 通过安装在鼓轮上的编码器确定烟支的位置及其吹气动作时间点。

3. 实现功能介绍

本方案基于倍福 TWINCAT 运动控制软件搭建电气控制系统, 通过电机、变频器、编码器、色差检测器、高速光电检测器、继电器、安全继电器、高速电磁阀、高速工业相机等控制元器件及检测器件协同工作, 实现以下具体功能:

- 1) 通过烟支鼓轮输送细支卷烟残次品。
- 2) 细支卷烟残次品在烟支鼓轮内的方向识别(正向、反向)。
- 3) 烟支鼓轮内细支卷烟残次品的定位。
- 4) 烟支鼓轮内细支卷烟残次品在第一鼓轮(正向烟支)、第二鼓轮(反向烟支)吹气工作位的设定。
- 5) 烟支鼓轮内细支卷烟残次品经吹气工作位后未吹净烟支的成像检测。
- 6) 烟支鼓轮内细支卷烟残次品经吹气工作位后未吹净烟支在第二鼓轮的剔除。
- 7) 烟支鼓轮输送细支卷烟残次品时在第一鼓轮的堵塞检测及停机。
- 8) 细支卷烟残次品处理设备继电控制回路、安全急停回路、供电回路。
- 9) 设备运行速度、残次品处理数量、残次品未吹净率等数据计算、统计及 HMI 界面设计和显示。

通过上述各项功能的协同工作, 以满足 1000 支/分钟的处理效率要求。系统设计遵循可靠性、安全性、可维护性原则, 符合 IEC 61508 功能安全标准及 GB 50052-95 供配电规范。

整体工艺流程如图 1 所示。

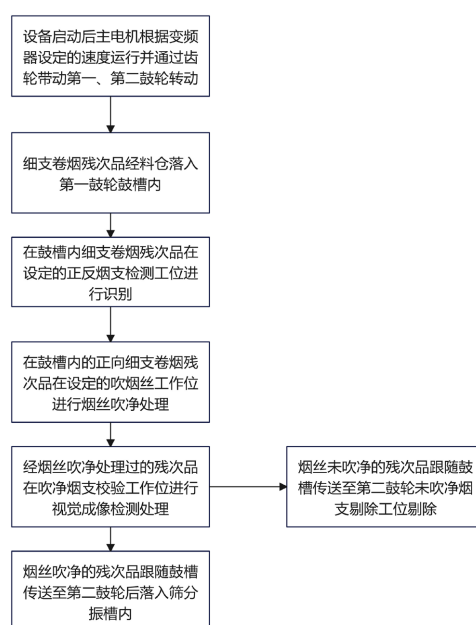


Figure 1. Process flow diagram

图 1. 工艺流程图

4. 电气设计方案

本系统针对卷烟生产环节中残次烟支的处理需求, 构建了一套集脉冲式烟支状态识别、烟丝分离、视觉检测、阻塞预警于一体的自动化处理方案。通过精准识别鼓轮槽内烟支的有无、方向正反, 实现残次烟支的定向分拣与烟丝高效回收, 并通过视觉检测有效分离吹净烟丝与未吹净烟丝, 最终完成合格烟丝与残次烟支的分类收集。同时, 系统创新性地引入连续空槽检测机制, 实现烟支阻塞故障的精准判定与预警。

系统构建“脉冲定位 + 时序补偿 + 视觉检测 + 智能剔除”一体化电控架构, 实现残烟全流程自动化处理。其中电控系统的框架设计如图 2 所示。

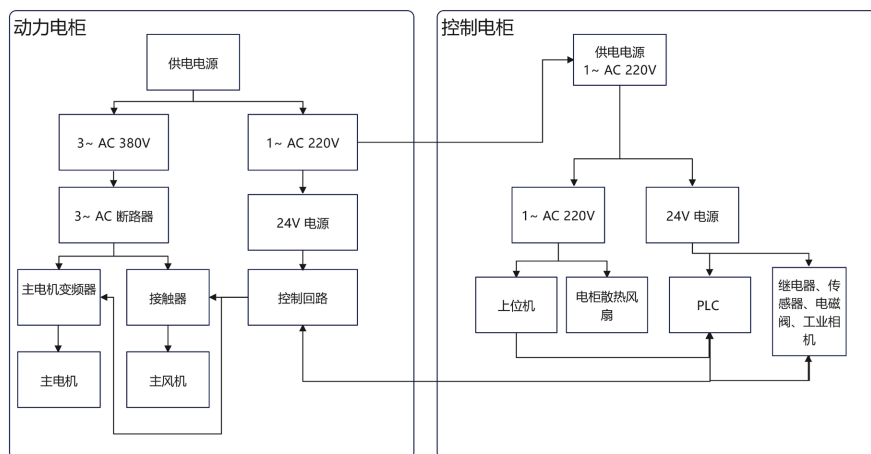


Figure 2. Electric control frame design
图 2. 电控框架设计

4.1. 脉冲生成

本设备的脉冲信号由与第二鼓轮联轴器同轴安装的增量式编码器生成, 编码器分辨率为 2048 PPR (脉冲数/转), 与第二鼓轮保持严格同步转动。第一、第二鼓轮间采用 9:1 的齿轮传动比, 当第二鼓轮转动 9 圈时, 第一鼓轮完成 1 整圈转动, 对应编码器输出 18432 个脉冲(9×2048)。第一鼓轮共设 72 个烟支槽位, 经计算, 单槽位对应基础脉冲数为 256 个。为满足高精度控制需求, 系统控制程序启用编码器四倍频功能, 将单槽位对应脉冲数提升至 1024 个——即每支残次烟支在单个槽位的停留周期内, 可产生 1024 个脉冲信号[4]。这一高精度脉冲控制体系, 为后续烟支有无检测、方向识别及精准吹气处理提供了可靠的时序基准, 保障了残次烟支处理环节的稳定性与准确性。

4.2. 吹气工作电气零位与机械零位对齐

通过盘车操作, 将第一鼓轮石墨压片的圆形出气孔与配气盘的圆形气孔调整至完全重合且同心状态, 此时两个气孔的同心圆圆心被定义为机械零位与电气零位的耦合基准位置。操作人员按下零位设定按钮后, PLC 控制系统将向增量式编码器发送置零指令, 完成零位标定[5]。零位标定完成后, 当鼓轮正常运转时, 其 72 个槽位的中心位置将各自对应生成一个脉冲信号。该脉冲信号作为精准的时序触发源, 可用于同步采集各槽位对应传感器的状态数据, 为后续烟支检测、处理环节提供可靠的时序基准。

4.3. 烟支状态移位寄存器

根据设计功能确定移位寄存器的大小: 以正反烟支检测工位作为起始位, 以未吹净烟丝烟支剔除工位作为结束位, 整条移位链共 66 个工位(烟槽), 故在 PLC 程序内申明定义一个 66 位数组作为正反烟支

状态移位寄存器, 色差检测传感器位于起始位, 鼓轮运行中每个槽经过一次色差传感器工位都将经 PLC 程序触发采集一次当前鼓槽内烟支的状态信号, 我们定义色差检测传感器高电平输出时状态为正向烟支, 低电平输出时状态为反向烟支。此时, 色差检测传感器的状态信号被标记进入正反烟支状态移位寄存器的第一位, 每经过一个鼓槽的中心位置, 该状态移位寄存器都将状态信号向后移动一位, 并将后续检测到的状态信号再标记进入状态移位寄存器的第一位, 循环往复实现了正反烟支状态的寄存和以一个鼓槽为单位向后步进移位的功能。

移位寄存器功能实现代码:

```
VAR
Cig_Status: ARRAY[0..65] OF BOOL; // 烟支状态寄存器
Slot_Pulse: BOOL; // 槽位中心脉冲
Color_Sensor: BOOL; // 色差传感器输入
END_VAR
// 移位逻辑
IF Slot_Pulse THEN
FOR i := 65 DOWNTO 1 DO
Cig_Status[i] := Cig_Status[i-1];
END_FOR;
Cig_Status[0] := Color_Sensor;
END_IF;
```

4.4. 吹气工位工作

本设备在第一、第二鼓轮上设计了两个吹气工位(第一鼓轮工位吹正向烟支, 第二鼓轮工位吹反向烟支)。烟支到达每个吹气工位时, 根据烟支状态移位寄存器的值判断在该工位是否吹气。由于电磁阀与鼓轮吹气孔间存在一段气管, 会产生气流传输延迟, 若在烟支到达鼓轮槽中心时才触发电磁阀, 将错过最佳吹气工位。此时, 系统前期设计的高精度脉冲触发机制将发挥关键作用: 可根据设备实时运行速度, 提前预设的脉冲量触发电磁阀, 通过精准的时序补偿抵消气管延迟, 确保气流在烟支处于最优位置时精准作用, 最大化提升吹气处理效果。其提前脉冲数计算公式如下:

$$N_advance = T_delay \times F_pulse$$

其中:

N_advance: 提前脉冲数;

T_delay: 气流传输时间(本设备 ≈ 5 ms);

F_pulse: 编码器实时脉冲频率。

4.5. 高速工业相机检测

为准确判定残次烟支中烟丝是否完全吹净, 需要在第一鼓轮吹气工位和第二鼓轮吹气工位的后续位置分别安装高速工业相机。这些高精度工业相机具备快速图像采集能力, 能够实时捕捉经过吹气处理后的烟支图像, 并将采集到的高清照片通过高速数据传输通道实时传输至 PC 端的专用图像处理软件系统, 并采用图像识别技术和模式匹配算法, 能够快速准确地分析烟支表面是否存在烟丝残留。为确保生产线的高效运行和实时检测需求, 整个图像处理算法的计算耗时被严格控制在 60 毫秒每支烟的范围内, 这样的处理速度完全能够匹配高速生产线的节拍要求。当图像处理软件完成对烟支图像的分析计算后, 会立即将检测结果以数字信号的形式输出至 PLC (可编程逻辑控制器) 系统。PLC 接收到检测结果后, 会对未

吹净烟丝的残次烟支进行定位和剔除。

4.6. HMI 人机界面设计

为方便操作和直观查看设备运行情况, 还设计了相应的人机界面用以显示设备当前的运行速度, 已处理残次烟支数量, 烟丝吹净烟支数量, 残次烟支烟丝吹净率等关键运行指标。

5. 程序设计流程图

5.1. 程序流程图

程序流程图如图 3 所示。

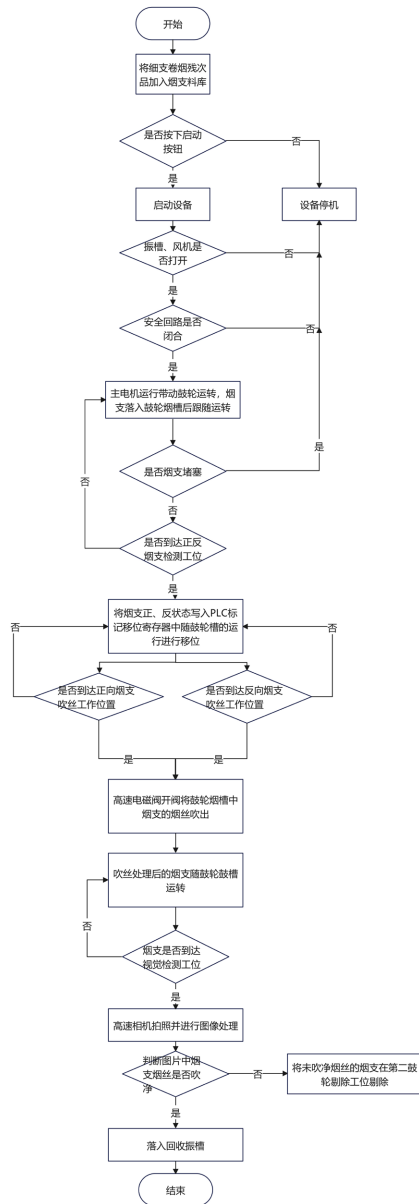


Figure 3. Program design flowchart
图 3. 程序设计流程图

5.2. 流程图步骤描述

- S1: 将细支卷烟残次品加入烟支料库中。
- S2: 判断启动按钮是否按下, 是则执行 S3A, 否则执行 S3B。
- S3A: 启动设备。
- S3B: 停止设备。
- S4: 判断振槽、风机开关是否打开, 是则执行 S5, 否则执行 S3B。
- S5: 判断安全回路是否闭合, 是则执行 S6, 否则执行 S3B。
- S6: 主电机运行通过机械传动带动鼓轮运转, 鼓轮带动鼓槽中烟支运转。
- S7: 光电传感器检测判断鼓轮鼓槽是否连续出现 5 个空槽, 是则执行 S3B, 否则执行 S8。
- S8: 判断鼓槽内烟支是否到达正反烟支检测工位, 是则执行 S9, 否则执行 S6。
- S9: 将烟支正、反状态写入 PLC 状态标记移位寄存器中, 跟随鼓槽的运行进行移位。
- S10A: 判断正向烟支是否到达吹气工位, 是则执行 S11, 否则执行 S9。
- S10B: 判断反向烟支是否到达吹气工位, 是则执行 S11, 否则执行 S9。
- S11: PLC 控制高速电磁阀开阀通过高速气流将鼓轮烟槽烟支中的烟丝吹出。
- S12: 吹丝处理后的烟支随鼓轮鼓槽运转。
- S13: 判断吹丝处理后的烟支是否到达视觉检测工位, 是则执行 S14, 否则执行 S12。
- S14: 高速工业相机拍照并进行图像处理。
- S15A: 判断图片中烟支烟丝是否吹净, 是则执行 S16A, 否则执行 S15B。
- S15B: 将未吹净烟丝的烟支在第二鼓轮剔除工位剔除。
- S16A: 吹净烟丝的烟支落入筛选振槽。
- S16B: 未吹净烟丝的烟支落入收集盒。
- S17: 经筛选后的吹净烟丝的烟支落入收集盒。

6. 实验结果与分析

经过与机械结构位置的反复配合调试与参数优化, 该回收系统最终实现了较为理想的烟丝与烟支杆分离效果: 在 800 支/分钟的连续处理速度下, 烟丝吹净率稳定达到 95%以上, 满足规模化回收的效率要求; 设备操作流程经过优化设计, 仅需单人即可完成进料、监控、出料等全流程操作, 相较于传统人工分离方式, 大幅节省了人力资源投入, 降低了企业的人力成本; 同时, 采用脉冲吹气的分离方式, 可有效避免烟支杆因受力过大发生破损, 保持烟支杆的结构完整性, 且分离后的烟丝中无残留碎纸屑、醋酸纤维等杂质异物, 显著提升了回收烟丝的纯净度, 为后续烟丝的再利用提供了质量保障。

6.1. 实验条件

- 1) 处理对象: 细支残次烟支;
- 2) 运行速度: 800 支/分钟;
- 3) 气源压力: 0.5~0.7 MPa;
- 4) 环境温度: $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

6.2. 评价指标

- 1) 烟丝吹净率: $\text{吹净烟支数} / \text{总处理烟支数} \times 100\%$;
- 2) 烟丝纯净度: $\text{杂质质量} / \text{总烟丝质量} \times 100\%$;

- 3) 误剔除率: $\text{误剔除烟支数} / \text{总处理烟支数} \times 100\%$;
- 4) 单支处理时间: ms/支。

6.3. 实验数据

不同运行速度下的吹丝性能对比数据统计见表 1。

Table 1. Comparison of system performance at different operating speeds

表 1. 不同运行速度下系统性能对比

处理速度(支/分钟)	烟丝吹净率(%)	烟丝纯净度(%)	误剔除率(%)	单支处理时间(ms)
600	97.2	99.8	0.3	100
800	95.3	99.7	0.5	75
1000	92.6	99.5	0.8	60

本系统回收残次烟支烟丝效率与之间人工回收对比见表 2。

Table 2. Comparison between this system and manual processing

表 2. 本系统与人工处理对比

指标	本系统	传统人工处理
处理效率	800 支/分钟	30 支/分钟
烟丝吹净率	$\geq 95\%$	85%~90%
烟丝纯净度	$\geq 99.7\%$	95%~97%
人力配置	1 人	4~6 人
烟支杆完整率	$\geq 98\%$	60%~70%

6.4. 失败案例分析(5%未吹净烟丝烟支)

- 1) 烟支严重变形(占比 3.2%): 槽位定位偏差, 吹气角度偏移;
- 2) 气源压力波动(占比 1.1%): 瞬时压力不足导致吹吸不彻底;
- 3) 烟丝结块(占比 0.7%): 烟丝粘连, 气流无法完全剥离。

6.5. 稳定性分析

八小时连续运行数据显示, 吹净率波动范围 **95.0%~96.1%**, 系统稳定性良好, 满足工业化连续生产要求。

7. 方案对比分

本系统回收残次烟支烟丝效率与其他烟丝回收方式优缺点对比见表 3。

Table 3. Comparison between this system and other tobacco shred recycling technologies

表 3. 本系统与其他烟丝回收技术对比

技术方案	原理	优点	缺点	适用场景
人工划破分离	手工割裂烟支	设备投入低	效率低、纯净度差	小批量、试验线

续表

机械切割分离	刀具切割烟支	速度较快	烟支杆破损、烟丝污染	常规烟、低品质回收
脉冲吹气分离	高压脉冲气流剥离	无破损、高纯净度、高速	需精准时序控制	细支烟、规模化高品质回收

本方案在细支烟适配性、烟丝纯净度、烟支完整性、处理效率上具备显著优势。

8. 展望

本系统实现细支残烟高速、高精度、高纯净度自动化回收，核心结论如下：

- 1) 编码器四倍频控制有效提升位置精度，是保障吹净率的关键；
- 2) 气流延迟补偿算法解决时序偏差问题，显著提升分离稳定性；
- 3) 视觉检测与智能剔除确保回收质量一致性。

后续优化方向：

- 1) 将鼓轮驱动电机替换为伺服电机，实现全闭环位置控制，进一步提升定位精度；
- 2) 优化图像处理算法，降低烟支变形、烟丝结块导致的误判；
- 3) 增加数据上传接口，实现与工厂 MES 系统对接，满足数字化管理需求。

参考文献

- [1] 赖征升. 倍福嵌入式 PC 在 ProtosM5 卷接机电控系统的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(17): 87.
- [2] 孔令韬. 李航. 李昂. 爆珠烟支的回收装置的设计与开发[J]. 仪器与设备, 2024(12): 656-661.
- [3] 黄卿霖, 等. YF17 卷烟存储输送系统烟支自动排空装置的设计[J]. 仪器与设备, 2020, 8(2): 77-84.
- [4] 郑焕南, 孙文. 基于事件触发脉冲控制的变时滞系统稳定性研究[J]. 动力系统与控制, 2021, 10(1): 13-23.
- [5] 邓光华. 卷烟卷接工专业知识[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2012.