

烟草供料成条机导轨滑块结构 离散化滞后控制研究

张红亮

(河北白沙烟草有限责任公司 保定卷烟厂, 河北 保定 074200)

摘要: 烟草供料成条机在控制过程中存在延迟滞后的问题, 难以满足不同类型烟草供料的成条需求, 导致烟草供料成条机卷烟支质量较差, 难以保证烟丝束密度均控制标准范围内; 研究烟草供料成条机导轨滑块结构离散化滞后控制方法, 分析供料成条机结构, 设计由导轨滑块结构组成的集流装置, 能够在离散化和成束阶段降低机器共振幅度, 提高烟丝束质量; 设计离散化滞后控制算法, 通过气-液信息放大重量装置, 放大卷制前烟丝束瞬时质量信号, 精准控制平准器进行气-电升降改变修剪位置, 改善控制滞后问题, 平衡每一支烟的烟丝束密度; 利用离散化模糊 PID 技术模糊化内部机械振动和外界环境干扰, 实现导轨滑块结构离散化滞后控制; 实验证明, 通过这种技术改造的供料成条机能够解决控制滞后问题, 提高烟支质量, 降低烟支碎丝率和空头率。

关键词: 导轨滑块结构; 烟草供料成条机; 滞后控制; 离散化模糊 PID 控制; 烟丝束密度

Research on the Discrete Hysteresis Control of the Guideway Slider Structure of Tobacco Feeding and sliver forming Machine

ZHANG Hongliang

(Baoding Cigarette Factory of Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Baoding 074200, China)

Abstract: The control process of a tobacco feeding and sliver forming machine has a delay problem, it is difficult to meet the requirements for sliver forming of different types of tobacco, leading to poor cigarette quality of the tobacco feeding and sliver forming machine, and it is difficult to ensure that the cut tobacco density is within the control standard. A discrete lag control method for the slider structure of tobacco feeding sliver is studied. Analyze the structure of the feeding and sliver forming machine, and design the current collecting device of the rail slider structure, which can reduce the resonance amplitude of the machine in the discretization and bunching stages, and improve the quality of the cut tobacco bunches. The discrete lag control algorithm is designed to amplify the weight device through the gas-liquid information, amplify the instantaneous quality signal of the cut tobacco bundle before the coiling, accurately control the leveler to change the trimming position through the gas-electric lifting, improve the control lag problem, and balance the cut tobacco bundle density of each cigarette. The discrete fuzzy PID technology is used to fuzzify the internal mechanical vibration and external environmental interference, and realize the discrete lag control of the guide slider structure. The experimental results show that the feeding and sliver forming machine can solve the lag problem, improve the cigarette quality, and reduce the cigarette shredding rate and vacancy rate.

Keywords: rail slider structure; tobacco feeding sliver forming machine; lag control; discrete fuzzy PID control; tobacco bundle density

0 引言

烟草供料成条机的功能是将团结在一起、杂乱无章的烟丝进行松散化处理, 去除烟草中金属颗粒、有机杂质、烟草梗以及过短烟丝, 将层层筛选好烟丝划分为规定重量的烟丝束, 按照标准规格扭卷为烟支, 再经过包装销售供消费者使用。烟支是否能够被市场接受取决于消费者满意程度, 而满意度被烟支质量优劣左右, 去除烟草本身质量偏差, 影响烟支质量最重要的因素就是烟草供料成条步骤。如果烟丝长度参差不齐, 到达规定重量烟丝束形成烟支会

不够均衡蓬松, 口感很差, 还极易发生爆口, 烟支质量差^[1]。

机械制造程度是衡量任意领域的制造业整体水平和能力的重要标志, 为提高烟草行业在国际的竞争实力, 优化生产效率和烟支质量, 本文创新性地对烟草供料成条机结构进行优化, 提出烟草供料成条机导轨滑块结构离散化滞后控制技术。基于导轨滑块结构的烟草供料成条机离散化滞后控制技术。导轨滑块结构的集流过程会产生一定的阻尼, 能够保证烟草在进行松散化过程中的稳定, 避免烟支被抛洒出流水线, 杜绝浪费。设计离散化滞后控制算法,

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2022-12-21。

作者简介: 张红亮(1976-), 男, 河北望都人, 高级工程师, 主要从事烟草设备管理及烟草设备技术改进工作方向的研究。

引用格式: 张红亮. 烟草供料成条机导轨滑块结构离散化滞后控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 124-129.

通过放大卷制前烟丝束瞬时质量信号, 精准控制烟束修剪位置, 改善烟草供料成条机控制过程的滞后问题, 最后利用离散化 PID 技术控制内部机械振动和外界环境干扰, 平衡不同种类烟丝束的密度, 实现导轨滑块结构离散化滞后控制。

1 烟草供料成条机导轨滑块结构改进设计

烟草供料成条机是现代计算机与机械制造业结合产物, 是高稳定性和高效率的自动卷烟设备, 主要模块有: 机械动力模块、烟草供给模块, 烟丝烟梗分离模块、烟支束重量控制模块、回丝模块, 液压成型模块。烟草供料成条机的组成如图 1 所示。

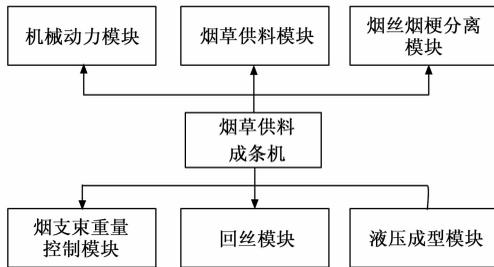


图1 烟草供料成条机的导轨滑块结构

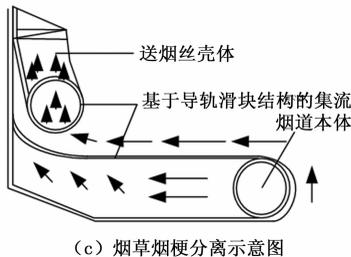
现阶段的供料成条机都已经形成了相对完善的体系, 结构较为统一^[2], 但是各国产机型的烟丝松散程度和烟丝束均匀程度都远远达不到国际标准。为此本文拆分烟草供料成条机结构, 深入研究, 分析导轨滑块结构在其中的应用价值和流程^[3], 为实现优化成条机系统模块提供真实数据, 使出产效率和质量达到国际标准。安装在烟草供料成条机的导轨滑块结构如图 2 所示。



(a) 烟草供料成条机整体



(b) 导轨滑块实物照片



(c) 烟草烟梗分离示意图

图2 烟草供料成条机的导轨滑块结构

如图 2 所示, 导轨滑块主要由两条导轨、一个滑块和钢丝连接构成, 在成条机机械动态力作用下, 导轨滑块的集流会具有一定的弹性^[4], 其振动产生的阻尼能够降低成条机在烟丝烟梗分离时的共振幅度^[5-7], 提高集流烟丝重量精度。该结构解决了由于传动带传输导致烟丝容易断折的问题, 先简单地将烟丝团进行初步松散, 随后借助于导轨

滑块装置将烟丝按照箭头指示方向输入集流管道中^[8], 分散的烟丝在垂直向上气流的作用下, 重的烟梗、金属碎屑等会被沉淀于下方, 优质且较长的烟丝有足够体积被气流输送至上方, 同时, 集流管道是由具有大量密集网孔的不锈钢板构成, 还能进一步去除传统成条机难以去除的灰尘和细碎烟丝, 使香烟的口感更加醇厚和优质。

导轨滑块结构技术原理如下: 个体在固定空间内气流中进行自由运动, 气流速度为 v , 假设能够静止在气流中, 那么该个体的加速度 α 表示为:

$$\alpha = \frac{R}{m} = \frac{K\gamma F}{mg} v^2 = \frac{K\gamma F}{G} v^2 \quad (1)$$

式中, R 表示气流对烟草的作用力, G 表示垂直向下的重力作用力, $G = mg$, m 表示烟草质量, g 表示重力, $\frac{K\gamma F}{G} = K_q$ 表示漂浮系数, 其中 K 表示气流阻力系数, F 表示烟草面对气流面积, K 表示空气重度, K_q 和 K/G 的值成正比, 可得出在其他影响因子不变的条件下, K/G 比值越大, K_q 系数值也越大, 那么可以将式 (1) 改写为:

$$\alpha = \frac{K\gamma F}{G} v^2 = K_q v^2 \quad (2)$$

进一步求出粒子悬浮速度 v_0 , 若 $R = G$, 那么:

$$\frac{G}{m} = g = K_q v_0^2 \quad (3)$$

可求得:

$$v_0 = \frac{g}{K_q} \quad (4)$$

烟草的漂浮系数 K_q 的悬浮速度 v_0 可通过烟草种类和配比进行调节, 由于烟丝、烟梗、金属微粒、其他有机杂质的质量、形状等特征不同, 个体的漂浮性能也不一致, 在基于导轨滑块结构中面对的空气阻力也不同, 所以利用导轨滑块结构能够将烟丝和杂质很好地分离出来^[9-11]。

2 导轨滑块结构离散化滞后控制算法设计

经过导轨滑块结构处理后的烟丝束, 烟丝重量和体积仍不够均衡, 直接成型为卷, 一支烟不同位置的松紧程度各不相同, 在燃烧过程中非常容易发生爆口事故, 影响吸烟者口感; 且不同烟支间的尺寸偏差过大, 不利于计量和售卖。为了平衡烟束重量, 本文将离散化滞后控制算法分为检测—控制—平衡三步骤, 通过气—液放大重量装置, 凭借放大卷制前烟丝束瞬时质量信号, 控制平准器进行气—电升降, 改变修剪位置, 平衡每一支烟的烟丝束密度。烟丝束密度控制流程如图 3 所示。

2.1 基于超声波传感器的卷制前烟丝束瞬时质量信号采集

为了精确采集到卷制前烟丝束瞬时质量信号, 需要利用超声波传感器采集原始烟丝束瞬时质量信号, 并对烟丝束瞬时质量信号进行去噪处理。

超声测距技术是一种方向性好、测量精度高、可靠性高、抗干扰性好的非接触式测量技术、具有能够实时连续测量物体物理距离的优点。它是一种非接触式测量技术, 不会受到烟丝的表面性质及粉尘的影响, 尤其适用于在阴

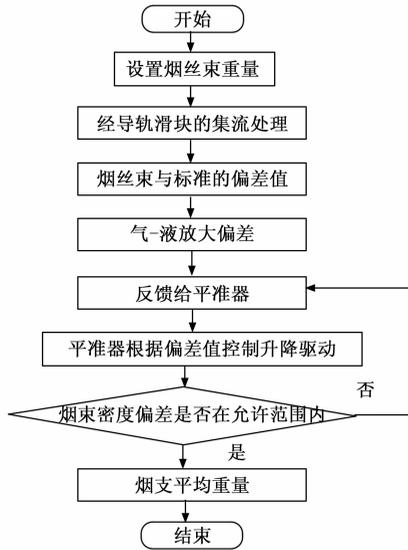


图 3 烟丝束密度控制

暗、多灰、高湿度环境下生产的制丝现场。采用多个超声波传感器感知导轨滑块结构烟丝束瞬时质量信号，因为导轨滑块结构的烟丝束瞬时质量信号数据量较大，因此选用非线性阈值方法对信号去噪，该方法的优点是操作简单且计算量较小，可以保证信号中的噪声被清理干净。首先小波分解烟丝束瞬时质量信号，根据分层对应系数选取合适的软硬阈值进行处理，这样的优点是避免因噪声排除对信号的影响，最终在系数的协助下对信号进行逆变换并完成信号的重构序列。

将超声波传感器在输送带上垂直安装，通过超声探测器将一束超声脉冲信号发送至输送带上的烟丝，通过与烟丝表面相接触，并将此过程所经过的时间和已知的超声传输速率相组合，得出测量的烟草的长度再将信号反射回去，利用探测器接收信号。通过超声波传感器采集到带有噪声的烟丝束瞬时质量信号为 $x(k)$ ：

$$x(k) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^N F_j^2} \quad (5)$$

式中， N 为超声波传感器数量， F_j 为一束超声脉冲信号与烟丝束瞬时接触的回弹信号。

选取烟丝束瞬时质量信号适合的去噪小波基函数，首先小波分解原始烟丝束瞬时质量信号，提取出烟丝束瞬时质量信号对应的尺度与细节系数，则烟丝束瞬时质量信号小波分解的表达式为：

$$\begin{cases} a_{j,k} = \sum_n a_{j-1,n} h(n-2k) \\ d_{j,k} = \sum_n a_{j-1,n} g(n-2k) \end{cases} \quad (6)$$

式中， $a_{j,k}$ 为小波分解的尺度系数， $d_{j,k}$ 为小波分解的细节系数， h, g 为滤波器， j 为小波分解层数， k 为离散点采样点数， n 为离散点全部数量。

经过阈值处理的细节系数可以留下真实有效的细节系

数，将烟丝束瞬时质量信号中因噪声出现的假性信号排除，阈值处理方法包含硬阈值和软阈值函数法，其中硬阈值函数法的表达式为：

$$W(d_{j,k}) = \begin{cases} d_{j,k} & (|d_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0 & (|d_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (7)$$

式中， $W(d_{j,k})$ 为阈值处理后的小波细节系数。

软阈值函数表达式为：

$$W(d_{j,k}) = \begin{cases} \text{sgn}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \lambda) & (|d_{j,k}| \geq \lambda) \\ 0 & (|d_{j,k}| < \lambda) \end{cases} \quad (8)$$

式中， sgn 为符号函数， λ 为最合理的阈值。

经过软阈值函数对小波系数进行收缩处理后，即可重构出较光滑性的信号，根据信号的属性选取合适的阈值函数进行处理。

大部分信号去噪需要预知信号以及噪声相关的先验知识作为依据支撑，但实际计算过程中，因先验知识提取较为困难，导致去噪性能下降，因此选用 GCV 准则用于选取软硬阈值，在该准则下不需要再提取先验知识即可得到理想的去噪结果，其中 GCV 的函数表达式为：

$$GCV(\lambda) = \frac{M \|\vec{d} - \vec{W}_d\|^2}{M_0^2} \quad (9)$$

式中， M_0^2 为可小波系数为 0 的数量， M 为小波系数的数量， \vec{d} 为实际带有噪声烟丝束瞬时质量信号对应的小波分解系数， \vec{W}_d 为经过阈值化处理后的小波分解系数矢量。

逆变换阈值处理后的小波系数，即可重构去噪后的烟丝束瞬时质量信号，得到干净的且无限接近于原始信号的烟丝束瞬时质量信号，其中小波重构的计算公式为：

$$a_{j-1,n} = \sum_n a_{j,n} h(k-2n) + \sum_n W d_{j,n} g(k-2n) \quad (10)$$

根据上式即可得出去噪后的导轨滑块结构烟丝束瞬时质量信号。

2.2 基于平准器改变修剪位置

通过气-液放大重量装置，计算放大后的卷制前烟丝束瞬时质量信号为：

$$h(k) = \sqrt{x(k) a_{j-1,n} \left(\frac{x^*(k) - \chi x(k)}{x(k)^0} \right)} \quad (11)$$

式中， $x^*(k)$ 为放大处理后的信号， χ 表示气-液放大重量装置计算系数， $x(k)^0$ 为采集到的原始信号最大值。

控制平准器进行气-电升降，改变修剪位置，平衡每一支烟的烟丝束密度，方程为：

$$\rho = \frac{h(i,j)}{\sum_{i=1}^o d_i x_i} \quad (12)$$

式中， d_i 为烟丝修剪长度， x_i 为修剪次数， o 表示最优修剪位置。

2.3 基于 PID 技术的导轨滑块结构离散化滞后控制

离散化滞后控制作为烟草供料成条机的前反馈系统，烟丝束重量偏差处在一定范围内能够正常卷制，烟支产出量高控制系统经多次运算难免出现逻辑混沌，为优化系统

细微偏差，本文使用 PID（比例—积分—微分控制）完成技术实现离散化滞后控制^[12-14]。其中比例用于描述供料成条机历史数据，积分用于描述现成条机阶段运行，去除稳态误差，微分用于在进行预判的同时调整控制量^[15]，通过对成条机运行系统的 3 种状态进行评估和判断，从而实现了导轨滑块结构滞后输送自动化控制。

PID 是线性组合控制技术，通过对烟丝束偏差 Δx_i 进行比例—积分—微分运算，实现烟草供料成条机对烟丝束密度的离散化控制。

输入值和输出值间关系如下：

$$V_i = K_p \left(\Delta x_i + u(t) \frac{1}{T_i} \int_0^1 \Delta x_i + T_d \frac{d\Delta x_i}{dt} \right) \quad (13)$$

式中， K_p 表示比例系数， T_i 表示对烟丝束偏差 Δx_i 进行积分处理的值， $u(t)$ 为控制策略， K_i 表示积分系数， T_d 表示对烟丝束偏差 Δx_i 进行微分处理的值， K_d 表示微分系数，且 $K_d = K_p T_d$ 。

考虑到实际烟草供料成条机工作过程会受到太多内部机械振动和外界环境干扰^[16]，系统的不确定性和线性特征模糊，直接使用线性 PID 技术的控制效果极差，难以满足正常需求，为此将模糊控制理论和 PID 结合，实现烟草供料成条机离散化控制^[17-19]。离散化模糊 PID 控制流程如图 4 所示。

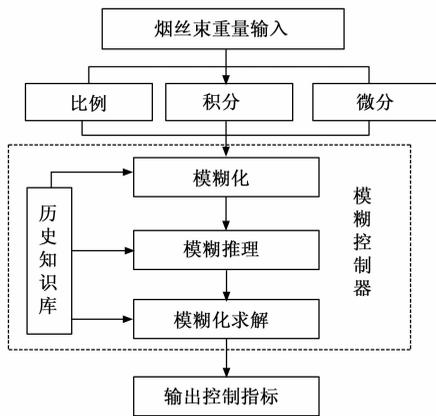


图 4 离散化模糊 PID 控制流程

模糊控制器的传递函数形式为：

$$Q_s = \frac{U_s}{E_s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (14)$$

其中： U_s 表示模糊化输入值和输出值的关系， E_s 表示模糊控制误差， s 表示被控制主体。

通过离散化模糊 PID 控制，实现对烟丝束重量偏差的微小控制，具体步骤为：

步骤 1：确定烟丝束偏差偏差。烟丝束偏差是输入值 x_i 和输出值 x'_i 间的比较，存在关系：

$$\Delta x_i = x_i - x'_i \quad (15)$$

步骤 2：确定模糊 PID 控制策略。将公式 (15) 中烟丝束偏差偏差输入到模糊规则中，得到烟丝束偏差补偿模糊子集^[20-22]。利用 PID 控制算法，以烟丝束偏差补偿模糊子集、烟丝束偏差偏差模糊量作为输入量，计算控制策略：

$$u(t) = K \left[e(t) \Delta x_i + \int \delta dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (16)$$

式中， $u(t)$ 表示烟草供料成条机导轨滑块结构模糊 PID 控制策略， K 表示模糊 PID 控制器参数， $e(t)$ 表示 PID 控制器输入量，即烟丝束偏差补偿模糊子集， δ 、 T_d 分别表示积分时间常数、微分时间常数，正常情况积分时间常数取值范围为 0~1，微分时间常数取值范围为 0.5~1.5^[23-25]。

步骤 3：烟丝束偏差控制。根据实际情况对 PID 控制器参数设定，将 $u(t)$ 代入公式 (13)，对烟丝束偏差补偿处理，实现烟丝束偏差的离散化模糊 PID 控制，解决了控制过程的滞后问题。

3 实验测试与结果分析

3.1 实验参数设置

为验证所提技术实际应用的效果，进行技术性能测试。烟丝结构和长短是影响烟草供料成条的关键因数，为此，本文将设计的机器与控制算法下处理好烟丝束再次经过三层筛网进行振动分离，以整丝率和碎丝率作为评价指标，明确控制技术处理的烟草质量。烟草原料和烟支规格如表 1 所示，筛网规格如表 2 所示。且安装在振动分离器上的筛网满足 GB/T5330.2 规定。分别为表 1 烟草原料和烟支规格、表 2 筛网规格。

表 1 烟草原料和烟支规格

指标	含量
烟草含水量	1.65%~1.85%
烟支规格	(64 mm±20 mm) * 24.2 mm
烟支重量	0.85 g±0.05 g

表 2 筛网规格

网孔大小	网孔直径	筛网大小	筛分面积/%
3.55 * 3.55	0.99	720 * 480	65
2.35 * 2.35	0.63	360 * 480	60
1.20 * 1.20	0.51	180 * 480	50

3.2 机器性能分析

本文选取超声波传感器型号为 PS-400 超声波纠偏传感器，其利用高频超声波直线传播的原理，能够检测到卷烟丝束边缘位置，且不受材料透明度的影响。将基于超声波传感器的卷烟高度监控系统安装在带式输送机上，并通过设置在带式输送机上的速度编码器，对其进行跟踪，并将其输出到控制系统中。最终由控制器对烟丝的运动高度和输送带的转速进行拟合，将超声传感器安装高度、输送带上烟丝宽度、不同等级烟丝的浓度等因素综合考虑，对通过各个监测点的带式输送机上的烟束的高度和传送带的转速进行了实时的测量，利用网络传输装置将烟丝的瞬时流量进行实时显示，并将其传递给主机，从而实现烟丝的瞬时质量信号可视化显示、储存及共享。

为测试用本文方法改造烟草供料成条机导轨滑块结构离散化滞后控制的效果，采用本文方法对机器进行改进后，

获取控制信号特征结果，查看延迟情况，由于篇幅限制，仅随机呈现一种控制信号和正常信号，用图 5 描述。

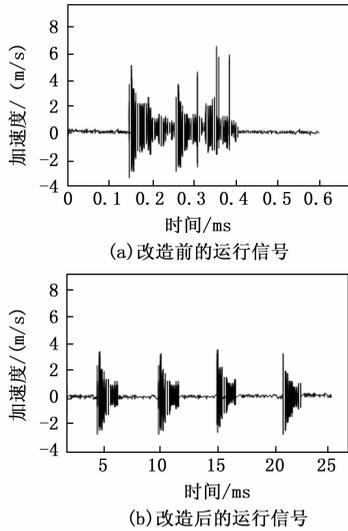


图 5 机器改造前后控制信号情况

分析图 5 可知，本文方法下的机器工作情况良好，对其进行结构改造后，能够可靠获取控制信号信息，并且，清晰呈现不同控制信号结果，为控制过程提供可靠的多态数据依据。并且，本文方法的一阶延迟得到了较好的缓冲，信号分布均匀，能够有效改善烟草供料成条机在控制过程中的延迟滞后问题。分析其原因可知，本文设计的离散化滞后控制算法，能够通过气—液信息放大重量装置，放大卷制前烟丝束瞬时质量信号，再利用精准控制平准器进行气—电升降改变修剪位置，有效改善了烟草供料成条机导轨滑块结构控制滞后的问题。

3.3 应用测试实验指标

1) 整丝率：

$$T_z = \frac{m_a + m_b}{M} \quad (17)$$

其中： T_z 表示整丝率， m_a 、 m_b 表示在 a 、 b 筛网上得到的烟丝重量， M 表示经过控制技术处理后烟草总重量，二者单位都是 g 。

2) 碎丝率：

$$T_s = \frac{m_c}{M} \quad (18)$$

其中： T_s 表示碎丝率， m_c 表示在 c 筛网上得到的烟丝重量，单位是 g 。

3.4 实验过程和结果分析

将技术控制下 4 种不同配比原材料，整丝率和碎丝率和人工分离得到的结果对比，如图 6 所示，人工分离结果为设定的理想输送控制结果，再对比成品的整丝率和碎丝率，图 7 所示，成品烟支烟丝指标通过剥离烟纸获得。

由于烟草内还存在其他杂质，所以整丝率和碎丝率相加结果不为 1。分析图 6、图 7 结果可知，原材料、成品烟支经所提控制技术和人工分离结果的整丝率和碎丝率值相

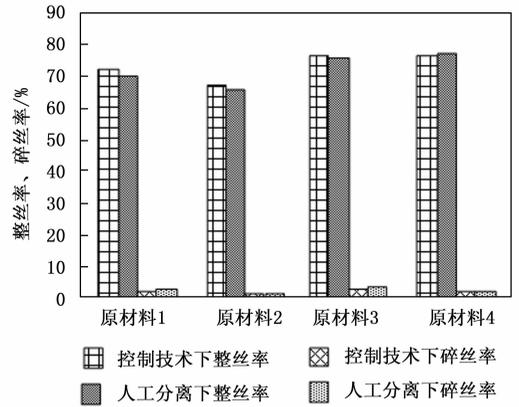


图 6 原材料整丝率和碎丝率对比

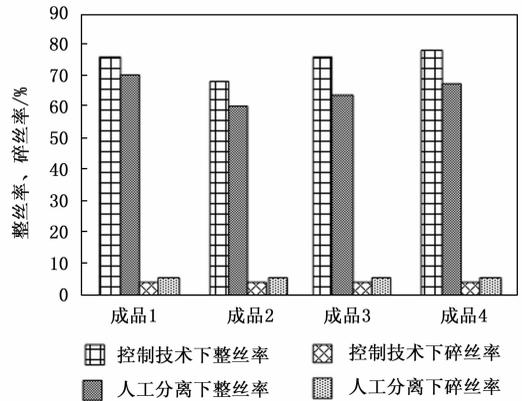


图 7 成品烟支整丝率和碎丝率对比

差较小，所提控制技术下数值相对高。分析器原因在于，在松散化处理过程中，部分碎丝一直游离于烟草上方，没有接触过下方筛网进而掉落。值得注意的是，在期望中成品烟支的整丝率和碎丝率应该和人工分离结果更加贴近，但是从图 6 中观察，二者碎丝量都提高了。

为此分别统计原材料和成品烟支碎丝长度，如图 8 所示。

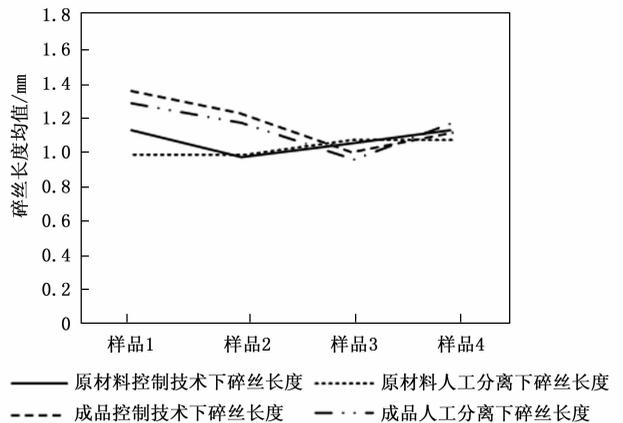


图 8 原材料和成品烟支碎丝长度对比

图 8 中能够看出，原材料和成品烟支碎丝长度均处于 $0.8 \sim 1.4 \text{ mm}$ 之间，没有过大差别，但是这部分烟丝应该在

烟丝松散化阶段被剔除。为此, 本文进行多次实验后发现, 在烟丝成束过程中, 为保证烟丝束密度, 平衡器通过放大的信号进行上下调节切割器, 在切割烟丝过程中, 切割器将长烟丝分为短烟丝, 短烟丝变成碎丝, 提升了碎丝率。

为进一步分析技术优劣, 计算所提技术控制下碎丝率和空头率、烟支质量的关系, 如图9所示, 用户能接受的空头率为1.5%~2.0%内。

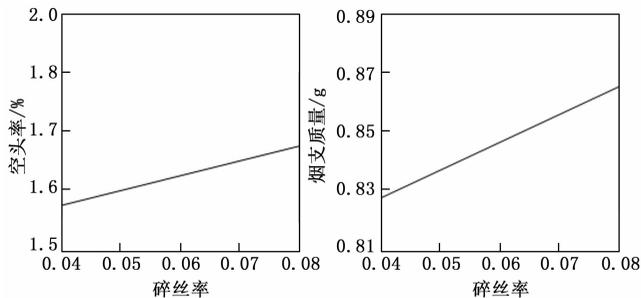


图9 碎丝率和空头率、烟支质量的关系

通过图9能够看出, 在技术控制下碎丝率的范围在0.04~0.08之间, 图8中的空头率在1.57~1.68间, 烟支质量在0.828~0.865g间, 都满足烟草供料成条要求, 证明技术能够很好地实现烟草供料成条的离散化滞后控制。分析其原因可得, 所提方法利用离散化模糊PID技术, 根据模糊度推断获取模糊度的集合, 模糊化外界环境干扰以及内部机械振动, 实现导轨滑块结构离散化滞后控制, 准确控制碎丝率和空头率满足烟草供料成条要求, 提升了烟支质量。

所提方法有效解决了烟草供料成条机控制过程的延迟滞后问题, 可同时满足不同种类烟草供料的成条需求, 提升了烟草供料成条机卷制烟支质量。

4 结束语

为降低烟支空头率, 提升用户的使用感, 本文设计烟草供料成条机导轨滑块结构的离散化滞后控制技术, 利用导轨滑块结构烟草供料成条机控制稳定性, 并放大瞬时烟丝束密度信号值, 通过平准器控制切割器, 实时调整切割位置, 减少控制滞后情况, 最后将模糊控制与PID技术结合, 利用比例-积分-微分动态调整输送物料量和速度, 实现离散化滞后控制。实验结果表明, 所提技术的碎丝率和空头率均满足烟草供料成条要求, 能够提高烟支质量, 减少烟支不同位置烟丝松紧程度不一问题。

参考文献:

[1] 戚玉海, 程荣俊, 叶运生, 等. 三坐标测量机气浮导轨滑块结构设计及仿真[J]. 工具技术, 2022, 56(1): 100-103.
 [2] 王梁, 安兴运, 张雪琴, 等. 双机械手变速协同输送控制策略研究及应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(16): 1985-1990.
 [3] 梅潇, 薛玉坤, 刘海文. 垂直螺旋输送不同物料特性的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2022, 28(2): 26-33.

[4] 黄光明, 谢显国. 木片输送系统自动化控制策略[J]. 中国造纸, 2021, 40(12): 71-75.
 [5] 马昆, 任予鑫, 李响, 等. 大倾角智能工作面刮板输送机“上窜下滑”自动化控制研究与应用[J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 96-100.
 [6] 王骁鹏, 赵新泽, 许翔, 等. 直线运动滚动导轨副混合润滑研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 260-266.
 [7] 李栋, 刘晓玲, 李磊, 等. 计入刚度影响效应的滚动直线导轨几何参数对润滑性能的影响[J]. 机械工程学报, 2021, 57(7): 100-108.
 [8] 俞福春, 欧屹, 王凯, 等. 基于中径和预紧摩擦力匹配的导轨副装配研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(6): 109-115.
 [9] 向明, 汪伟, 潘海鹏. 压力机滑块垂直度的自适应评价方法[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 146-151.
 [10] 赵建军. 变频跟踪调速带式输送机PLC模糊控制系统设计[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 100-104.
 [11] 宋璐, 卫亚博. 基于模糊PID的无刷直流电机速度控制系统的设计与仿真[J]. 大电机技术, 2022(5): 40-44, 82.
 [12] 王杰, 徐坤, 朱灯林. 闭式直驱液压伺服系统模糊PID控制技术[J]. 系统仿真技术, 2020, 16(4): 212-216.
 [13] 樊智敏, 王宝林, 樊宇. 基于粒子群算法的车辆半主动悬架模糊PID控制的优化研究[J]. 机械与电子, 2020, 38(11): 76-80.
 [14] 陈龙, 吴斌方, 张耀, 等. 基于模糊PID控制的步进驱动系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 99-102.
 [15] 魏莹吉, 侯亚雄, 李徽. 基于模糊PID控制的中间包感应式加热技术的研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(4): 12-14, 27.
 [16] 徐广龙, 陈宇, 金昊龙, 等. 基于模糊PID车姿调节控制技术研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(19): 82-86, 93.
 [17] 刘维鸽. 基于模糊PID自适应控制的液压伺服技术研究与应用浅析[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(5): 54-56.
 [18] 陈家辉, 王亚阁, 陈朝大, 等. 基于变论域模糊PID控制的四轴飞行器避障分析[J]. 微处理机, 2022, 43(5): 60-64.
 [19] 卢洪林, 陈涛, 刘翔, 等. YB65型条盒包装机异型包装改进[J]. 烟草科技, 2021, 54(4): 100-106.
 [20] 李秀伟. 基于动力学仿真的烟草包装机推烟机构优化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(3): 24-28.
 [21] 霍婷婷. 基于PID控制算法的二阶惯性纯滞后系统设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(21): 167-171, 176.
 [22] 王彰云, 黎明. 灰色预测模糊PID技术在船舶主机缸套冷却水温控制的应用[J]. 舰船科学技术, 2017(14): 79-81.
 [23] 李盛伟, 张来, 梁海深. 基于串级PID的相变储能电锅炉炉温度控制技术[J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 85-89.
 [24] 赵伟, 赵汗青. 基于模糊自整定PID的履带车辆自动驾驶系统纵向车速控制[J]. 计算机应用, 2018, 38(z1): 63-66.
 [25] 于洪国, 王平. 一种改进的最优PID参数自整定控制方法[J]. 现代电子技术, 2010, 33(19): 162-164.