



罗亮,师东方,朱鲜艳,等. 基于增量式 PID 算法的香精施加系统设计[J]. 轻工学报,2024,39(2):114-121.  
LUO L,SHI D F,ZHU X Y,et al. Flavoring system design based on incremental PID algorithm[J]. Journal of Light Industry,2024,39(2):114-121. DOI:10.12187/2024.02.015

# 基于增量式 PID 算法的香精施加系统设计

罗亮<sup>1</sup>,师东方<sup>1</sup>,朱鲜艳<sup>1</sup>,宗东岳<sup>1</sup>,王明辉<sup>1</sup>,王鹏飞<sup>1</sup>,金强<sup>1</sup>,李朝建<sup>2</sup>

- 南通烟滤嘴有限责任公司 研发中心,江苏 南通 226001;
- 江苏中烟工业有限责任公司 技术中心,江苏 南京 210019

**摘要:**为解决加热不燃烧烟草制品生产过程中香精施加量无法根据薄片质量变化进行实时调控的问题,设计了一种基于增量式 PID 算法的香精施加系统。该系统由称重单元、螺杆泵、喷嘴、流量传感器等组成,通过称重单元实时获取薄片质量数据,根据理论计算模型确定香精施加量,基于增量式 PID 算法驱动螺杆泵定量输出香精至喷嘴中,利用流量传感器对香精施加量实时反馈,实现香精精准施加。验证结果表明,当薄片质量发生变化时,香精施加量可快速调整,最大超调量为 1%,最长调整时间为 1.8 s,系统具有较好的跟踪性能;施加量检测值与理论值的偏移率为 0.23%~0.52%,施加量组内波动为 3.11%~4.17%,系统可实现香精的准确、均匀、稳定施加。

**关键词:**加热不燃烧烟草制品;增量式 PID 算法;香精施加系统;薄片

**中图分类号:**TS43 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)02-0114-08

## 0 引言

加热不燃烧烟草制品已成为烟草行业研究的热点<sup>[1-3]</sup>,与传统卷烟一样,其加香的准确性和均匀性直接影响产品的感官品质<sup>[4]</sup>。在加香方式方面,传统卷烟主要是烟丝加香、香线加香、丝束加香、爆珠加香等<sup>[5]</sup>,加热不燃烧烟草制品则主要是在连续切条的薄片上在线喷洒香精。在加香技术方面,传统卷烟研究较深入,例如付永民等<sup>[6]</sup>研究了随物料瞬时流量变化实现动态分级控制的烟丝加香系统,提升了烟丝加香均匀性和稳定性;张丽娜等<sup>[7]</sup>研制了

卷烟小样自动配料和加香的微型设备,实现了实验室加料加香环节的自动化、精准化,减少了实验室样品与实际生产线样品的品质差异;刘穗君等<sup>[8]</sup>基于 PID 控制设计了烟丝加香工序的专家控制系统,实现了烟丝流速自动跟踪、自动调整,提高了加香瞬时精度和整体精度。但有关加热不燃烧烟草制品加香技术的研究目前仍鲜有报道。加热不燃烧烟草制品在线加香通常先根据薄片理论质量计算相应比例的施加量,再按该施加量将香精恒定施加到薄片上,施加量无法根据薄片质量变化进行实时调控。而实际生产中,薄片实际质量与薄片理论质量有一定差异,

收稿日期:2023-05-26;修回日期:2023-10-24;出版日期:2024-04-15

基金项目:中国烟草总公司科技重大专项项目(110201901008(XX-08));江苏中烟工业有限责任公司科技项目(202205,202232,202233)

作者简介:罗亮(1988—),男,湖南省益阳市人,南通烟滤嘴有限责任公司工程师,主要研究方向为烟草设备及滤棒研发。E-mail:luoliang203@163.com

通信作者:李朝建(1972—),女,湖南省长沙市人,江苏中烟工业有限责任公司高级工程师,博士,主要研究方向为烟草化学及新型烟草制品。E-mail:280663090@qq.com

同一卷薄片不同部位的质量也随机波动,因此单位质量薄片中药香含量的不一致可能导致烟支感官品质的差异。

传统PID算法是目前研究者使用较多的一种控制算法,但每次输出值都需要进行大量运算,导致系统计算时间过长<sup>[9]</sup>,不适用于加热不燃烧烟草制品薄片原料高速运行时的香精实时调控。基于此,本文拟设计一种基于增量式PID算法的香精施加系统,在香精施加量的理论计算模型基础上,将采样周期内获取的薄片质量变化数据进行线性化近似处理,建立薄片质量、香精施加量的闭环控制流程,实现香精施加量随薄片质量的实时调控,满足香精施加非线性、滞后的控制要求,以期为加热不燃烧烟草制品香精的准确、均匀、稳定施加提供解决方案。

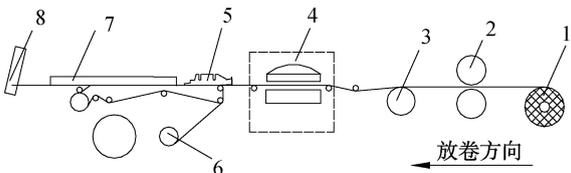
## 1 系统整体设计

### 1.1 烟芯棒生产工艺流程

加热不燃烧烟草制品的烟芯棒生产工艺流程如图1所示。由图1可知,成卷薄片沿图中放卷方向展开,切条辊将薄片切成宽约1 mm、纵向连续的薄片丝,并输送至香精施加系统中,在薄片丝表面精准施加香精后,收拢进入烟枪形成烟芯棒条,再在切割刀头作用下,被分切成长度约120 mm的烟芯棒。烟芯棒与降温段、醋纤段接装制成加热不燃烧烟草制品。

### 1.2 系统结构设计

香精施加系统整体结构如图2所示。由图2可知,系统选用3个气-液两相流喷雾喷嘴,自上而下施加香精,每个喷嘴通过独立的螺杆泵控制香精施加量。香精瞬时施加量可通过流量传感器在线监控、实时显示,并通过控制螺杆泵转速实现施加量的



1. 薄片放卷称重;2. 薄片切条;3. 丝状薄片输出;4. 香精施加;  
5. 丝状薄片收拢;6. 成型纸供给;7. 烟芯棒成条;8. 分切。

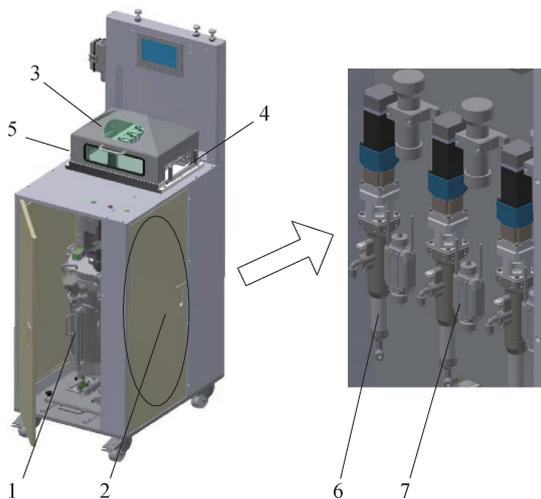
图1 烟芯棒生产工艺流程

Fig. 1 Manufacturing process of tobacco sheet rod

闭环控制。通过调整喷嘴喷雾压力、喷雾范围,保证香精喷雾液滴直径大小适宜,香精全部施加到薄片上表面。该系统可实现香精准施加、香精流量在线监测等功能的集成控制。

### 1.3 香精供给系统设计

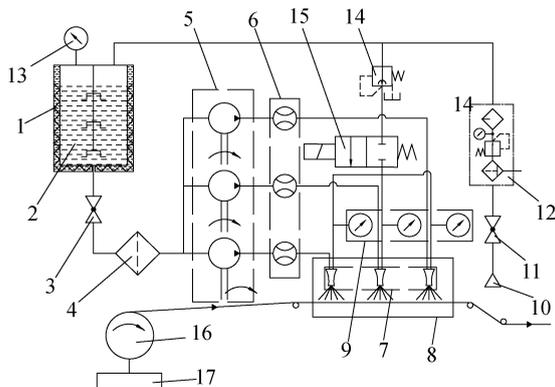
香精供给系统示意图如图3所示。由图3可知,正压空气经过滤后,一路进入恒温搅拌桶中,产生一定供液压力;一路经减压后进入喷嘴,控制香精启停、香精喷雾形状、香精喷雾液滴直径大小等。香精在供液压力作用下,经过滤后进入螺杆泵内,螺杆



1. 恒温搅拌桶;2. 螺杆泵及流量传感器;3. 喷洒室;  
4. 丝状薄片入口;5. 丝状薄片出口;6. 螺杆泵;7. 流量传感器。

图2 香精施加系统整体结构

Fig. 2 Schematic diagram of the flavoring system



1. 恒温搅拌桶;2. 香精;3. 出料阀;4. 香精过滤器;5. 螺杆泵;  
6. 流量传感器;7. 喷嘴;8. 喷洒室;9. 压力表;10. 气源;  
11. 进气阀;12. 气动三联件;13. 供液压力表;14. 减压阀;  
15. 电磁阀;16. 薄片及放卷系统;17. 称重单元。

图3 香精供给系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the flavor supplying system

泵由伺服电机带动,定量输送香精至喷嘴中,进而施加到薄片上。螺杆泵根据采样周期内薄片质量变化对香精理论施加量进行调整,并通过流量传感器实时监控相应管路中的瞬时流量,实现香精施加量的闭环控制。

烟芯棒生产过程中,称重单元实时监控薄片卷质量( $m_k$ ),PLC以采样周期( $T_k$ )读取质量的模拟量值,并计算出薄片卷质量变化值( $\Delta m_k$ )。初始状态时,系统按设定的初始施加量 $y_0$ 施加香精,第2次采样后的香精施加量则根据 $\Delta m_k$ 进行调整,香精施加量 $r(k)$ 和 $\Delta m_k$ 计算方法如下式所示:

$$r(k) = \Delta m_k \times \eta$$

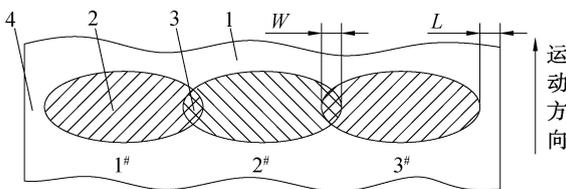
$$\Delta m_k = m_k - m_{k-1}$$

式中, $\eta$ 为香精含量设定比例; $m_k$ 、 $m_{k-1}$ 分别为第 $k$ 、 $k-1$ 次采样时的薄片质量/g, $k$ 为采样序号, $k=2,3,\dots$ 。

### 1.4 喷嘴喷雾特性

**1.4.1 喷雾形状** 喷雾形状是指喷雾的断面形状<sup>[10]</sup>,一般有实心圆锥、空心圆锥、扇形(椭圆形)等,根据实际使用要求的不同,所选择的喷雾形状也不同。本系统选用的喷嘴喷雾形状为扇形,薄片表面喷雾形状如图4所示。图4中1#、2#、3#分别为3个喷雾范围对应的喷嘴编号,相邻两喷嘴的喷雾范围重叠区域宽度为 $W$ ,薄片边缘的空白区域宽度为 $L$ 。

**1.4.2 喷雾角及喷雾范围** 喷雾角是指喷嘴出口到喷雾外包络线形成的两条切线之间的夹角,喷雾角及喷雾范围如图5所示。由图5可知,单个喷嘴喷雾范围可根据喷雾角( $\beta$ )及喷嘴出口至薄片表面的距离( $H$ )计算。香精液滴受到重力影响,喷雾在离开喷嘴后会略微收缩<sup>[11]</sup>,即实际喷雾范围( $S$ )近似为理论喷雾范围( $S'$ ),3个喷嘴总喷雾范围( $S_{\text{总}}$ )



1. 薄片;2. 单喷嘴喷雾范围;3. 重叠区域;4. 空白区。

图4 薄片表面喷雾形状

Fig. 4 Atomization shape on the surface of tobacco sheet

的计算方法如下式所示:

$$S_{\text{总}} = 3 \times S - 2 \times W \approx 3 \times S' - 2 \times W =$$

$$3 \times 2 \times \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \times H - 2 \times W$$

**1.4.3 喷雾碰壁模式分析** 本系统选用的喷嘴属于气-液两相流喷嘴,当正压空气对液滴表面的作用力大于液体的表面张力时,液滴碎裂成细小的颗粒<sup>[12]</sup>,并与薄片表面发生碰撞。液滴与薄片发生碰撞后,其运动行为受到诸多因素的影响,包括气流速度、液滴直径、香精特性、薄片表面粗糙程度等。液滴碰壁模式主要为沉积和飞溅<sup>[13]</sup>,在沉积模式下,液滴全部附在壁面上形成液膜;在飞溅模式下,液滴远离壁面反射出来。根据能量守恒定律,可推导出两种模式的转换临界值( $K$ )<sup>[14]</sup>。本系统的香精喷雾碰壁模式倾向于沉积,须尽可能减少飞溅。对于粗糙表面,液滴碰壁后的飞溅液滴质量( $m_s$ )与碰壁前的液滴质量( $m_w$ )可用飞溅量比值( $r_s$ )表示<sup>[15]</sup>。飞溅量比值与转换临界值有关,并可得出香精飞溅量近似值( $q$ )、香精的理论施加量( $Q$ )。计算方法如下式所示:

$$r_s = \frac{m_s}{m_w} = 8.035 \times 10^{-11} \times K^{4.1713}$$

$$K = \sqrt[4]{\frac{\rho^3 d^3 u^5}{\sigma^2 \mu}}$$

$$q = n \cdot r_s \cdot r(k)$$

$$Q = r(k) + q$$

式中, $\rho$ 为香精密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $d$ 为香精液滴直径/ $\text{m}$ ; $u$ 为香精喷洒速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),此处近似为喷嘴出口处的空气流速; $\sigma$ 为香精表面张力/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ); $\mu$ 为香精动力黏度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $n$ 为喷嘴数量/个。

由上述公式可知,在香精性状确定后,飞溅量比值仅与空气流速有关,空气流速越快香精飞溅量越

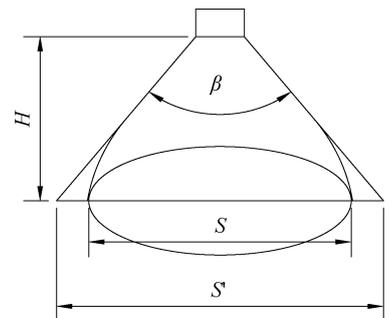


图5 喷雾角及喷雾范围

Fig. 5 Atomization angle and atomization range

多,香精的施加量理论值越大;空气流速越慢香精飞溅量越少,香精的施加量理论值越小。本系统设定的关键参数如下:薄片宽度为 130 mm,喷嘴直径为 0.5 mm,喷雾角为 45°,相邻喷嘴间距为 36.5 mm,喷嘴出口至薄片距离为 50 mm,喷雾压力为 0.1 MPa。根据系统设定的关键参数计算出的喷雾参数如下:重叠区域宽度为 4.92 mm,空白区域宽度为 7.87 mm,总覆盖范围为 114.42 mm,飞溅量比值为 0.001 5,香精飞溅量近似值为 0.35 g/min。

## 2 控制系统设计

### 2.1 PID 算法模型

PID 控制器是一种线性控制器,它根据给定值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差  $e(t)$ <sup>[16]</sup>,其控制规律如下式所示:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

将比例( $P$ )、积分( $I$ )和微分( $D$ )通过一定的线性组合构成控制量  $u(t)$ 。 $u(t)$  对被控对象进行控制,其控制规律如下式所示:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right]$$

式中, $K_p$  为比例系数, $T_I$  为积分时间常数, $T_D$  为微分时间常数。

### 2.2 增量式 PID 控制原理

计算机控制是一种采样控制,它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量。因此,连续的 PID 控制算法不能直接使用,需要进行离散化处理。假设采样周期为  $T$ ,以一系列的采样时刻点( $kT$ )代替连续时间( $t$ ),采用矩形面积求和方式近似积分,采用后向差分方式近似微分,可得到离散的 PID 控制模型<sup>[17]</sup>,如下式所示:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

式中, $k$  为采样序号, $k=1,2,\dots$ ;  $K_I = K_p \cdot T/T_I$ , 为积分系数;  $K_D = K_p \cdot T_D/T$ , 为微分系数。

由式①可知,每次输出的  $u(k)$  都与该时刻之前的状态有关,计算时需对  $e(k)$  进行累加,在控制过程中易因数据丢失等意外造成控制模型稳定性降低。为弥补上述缺陷,对模型进一步优化,根据递推原理可得到如式②所示模型:

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (2)$$

用式②减去式①就可得到增量式 PID 算法模型<sup>[18-20]</sup>,如式③所示:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (3)$$

式中, $A = K_p(1 + T/T_I + T_D/T)$ ,  $B = K_p(1 + 2T_D/T)$ ,  $C = K_p \cdot K_D/T$ 。

由式③可知,在系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  确定后,只要用前后 3 次测量值的偏差就可求出控制增量。基于增量式 PID 算法的香精施加控制流程如图 6 所示。

### 2.3 控制参数整定

为确定增量式 PID 控制参数,达到快速调整流量的目的,基于经验法对参数进行整定。首先确定临界比例系数,据此确定比例系数的赋值区间<sup>[21]</sup>。随后引入积分作用,积分时间常数由大到小进行整定,如果曲线波动较大,则增加积分时间;如果曲线偏离设定值较远,则减小积分时间。最后再引入微分作用,微分时间常数从 0 开始进行整定,如果曲线超调量大且衰减慢,则增大微分时间;如果曲线快速振荡,则减小微分时间。初步确定比例系数、积分时间常数、微分时间常数这 3 个参数后,再反复试验验证,直至获得最佳的控制效果。

由于薄片是合格产品,薄片质量波动在工艺范围内,薄片放卷称重采样周期可根据实际生产车速以及薄片卷总长度合理确定。根据实际经验,薄片称重采样周期在 5~7 s 较为适宜。薄片放卷称重与香精施加系统之间有一定距离(见图 1),在香精施加量设定前,须进行延时设定,延时时间( $T_2$ )根据实际生产车速、薄片放卷称重与香精施加系统之间的距离确定。控制系统参数设定值如下:采样周期为 0.1 s,薄片放卷称重采样周期为 6 s,延时时间为 6 s,比例系数为 4.2,积分时间常数为 28,微分时间常数为 2.38。

## 3 验证结果与分析

### 3.1 喷雾特性验证

1) 喷雾量验证。设定薄片定量为 180 g/m<sup>2</sup> 时,单喷嘴的喷雾量理论值为 23.52 g/min。在系统运行稳定后,关闭喷雾开关,将密封袋分别套在 3 个喷

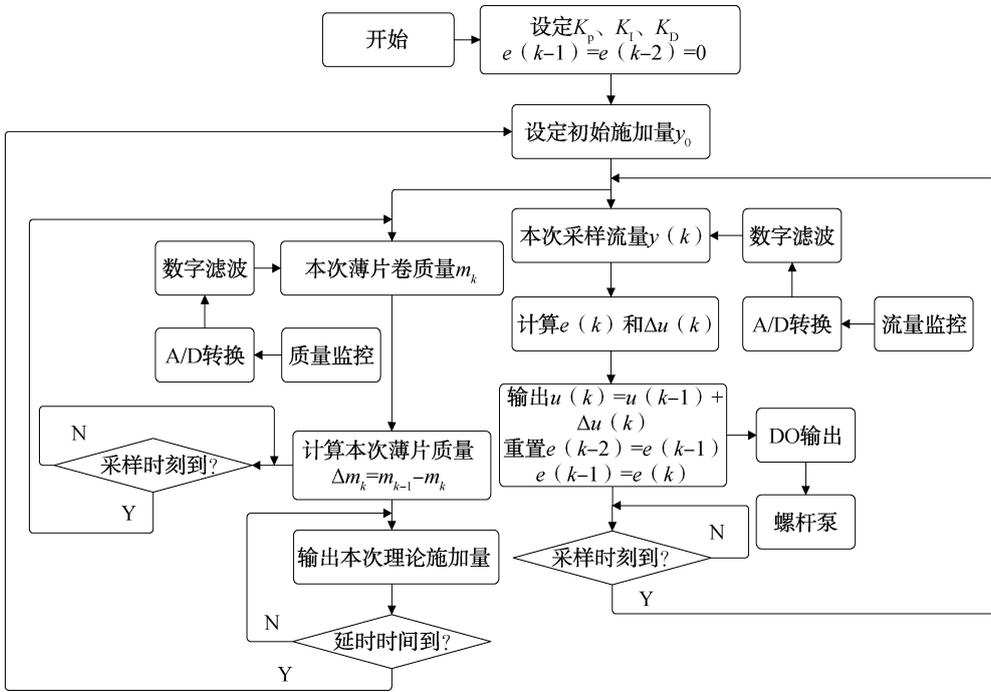


图6 增量式PID算法的香精施加控制流程

Fig. 6 Control flowchart of the flavoring system based on incremental PID algorithm

嘴的出口处,打开喷雾开关,计时1 min,称量各密封袋收集的香精量。每2 h称量一次,重复实验5次,喷雾量验证数据如表1所示。由表1可知,3个喷嘴的香精喷雾量实测均值与理论值的偏移率为0.16%~0.37%,偏移较小,且组内波动为2.11%~2.93%,说明喷嘴喷雾量较准确。

2) 喷雾范围验证。按照1.4中设定的系统关键参数调整香精施加系统,将一条宽幅为130 mm且施加香精后色差较为明显的纸带置于1#喷嘴下方,纸带位置与烟芯棒生产过程中的薄片位置一致,用密封袋将2#、3#喷嘴套住。按图1中薄片的放卷方向均匀拉动纸带,然后打开喷雾开关,使香精均匀施加到纸带上。取下纸带,立即用游标卡尺测量香精在纸带上的横向宽度,即为1#喷嘴喷雾范围( $S_1'$ ),用游标卡尺测量纸带边缘较小且未喷洒香精的区域宽度,即为1#喷嘴的空白区域宽度( $L_1'$ )。

表1 喷雾量验证数据

Table 1 Validation data of the atomization weight

喷嘴编号	喷雾量理论值/ ( $g \cdot min^{-1}$ )	喷雾量实测均值/ ( $g \cdot min^{-1}$ )	偏移率/%	组内波动/%
1#		23.452	0.29	2.11
2#	23.520	23.606	0.37	2.93
3#		23.482	0.16	2.62

按照上述方法,重复实验5次,可计算出1#喷嘴喷雾范围均值( $S_1$ ),1#、2#喷嘴空白区域宽度均值( $L_1$ 、 $L_2$ ),2#喷嘴喷雾范围均值( $S_2$ ),1#喷嘴与2#喷嘴同时工作时的喷雾范围均值( $S_{12}$ ),3#喷嘴喷雾范围均值( $S_3$ ),3#喷嘴空白区域宽度均值( $L_3$ ),3个喷嘴总喷雾范围均值( $S_{总}$ )。并进一步计算出1#喷嘴与2#喷嘴喷雾范围的重叠区域宽度( $W_{12}$ )、2#喷嘴与3#喷嘴喷雾范围的重叠区域宽度( $W_{23}$ )。计算方法如下式所示:

$$W_{12} = S_1 + S_2 - S_{12} \quad W_{23} = S_{12} + S_3 - S_{总}$$

喷雾范围实验结果如表2所示。由表2可知,喷雾重叠宽度、喷雾空白区域宽度、喷雾总覆盖范围实测均值与理论值基本一致,组内波动较小,说明该香精施加系统设计合理,喷雾效果达到设计预期。

表2 喷雾范围实验结果

Table 2 Test results of the atomization range

测试项目	宽度理论值/mm	宽度实测均值/mm	组内波动/%
$S_{总}$	114.42	115.26	2.16
$W_{12}$	4.92	5.26	无
$W_{23}$	4.92	4.64	无
$L_1$	7.87	7.54	3.73
$L_3$	7.87	7.48	3.59

### 3.2 系统控制性能验证

为比较传统PID算法及增量式PID算法的控制效果,选用正常生产过程中定量为 $180\text{ g/m}^2$ 的薄片,随机选取1个喷嘴,分别基于两种控制算法进行香精施加,获取香精实时施加量数据,去掉延时时间后绘制香精施加量响应曲线,结果如图7所示。由图7可知,薄片质量在工艺范围内波动时,采用增量式PID算法、传统PID算法的香精施加系统均能实现施加量随薄片质量变化快速调整;当采用增量式PID算法时,系统超调量及调整时间均明显小于传统PID算法,且有效避免了系统振荡,能更好满足香精施加的非线性、滞后控制要求。

为进一步验证基于增量式PID算法的香精施加系统控制性能,在薄片定量( $180\pm 20$ ) $\text{ g/m}^2$ 范围内设计5个定量梯度,分别为 $160\text{ g/m}^2$ 、 $170\text{ g/m}^2$ 、 $180\text{ g/m}^2$ 、 $190\text{ g/m}^2$ 、 $200\text{ g/m}^2$ ,并制备相应薄片卷样品,模拟同一卷薄片不同部位质量波动。使用香精施加系统,将薄荷香精施加在薄片上,香精含量设定比例为5%,其他生产工艺参数相同,制备烟芯棒样品。

在生产烟芯棒时,随机选取1个喷嘴,获取5个定量薄片的香精实时施加量数据,去掉延时时间后绘制包含香精理论施加量与实际施加量的曲线。不同定量薄片的香精施加量监控曲线如图8所示。由图8可知,针对5个定量薄片,当理论施加量发生变化时,实际施加量均能快速调整,并趋于此周期内的理论施加量;系统最大超调量及最长调整时间均出现在香精施加初始阶段,系统最大超调量为1%,最长调整时间为1.8 s,说明基于增量式PID算法的控

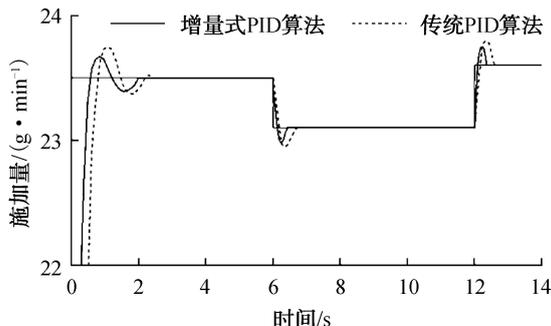


图7 不同控制算法施加量响应曲线

Fig. 7 Response curves of the spray weight with different kinds of control algorithm

制系统具有较好的跟踪性能,能满足香精施加的控制要求。

### 3.3 施加量GC-MS验证

分别使用基于传统PID算法、增量式PID算法的香精施加系统施加香精,使用5个定量薄片生产烟芯棒,同一定量薄片、同一算法生产的烟芯棒每隔10 min随机取样一次,共计取6份样品,每份样品取10支。检测分析时,每份样品中的10支烟芯棒各截取12 mm长度,充分混合后精确称取0.6 g试样,放入50 mL锥形瓶中,加入20 mL含有正十七烷(内标物)的乙醇溶液,以180 r/min振荡萃取90 min,取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,作为待测液,采用GC-MS检测烟芯棒中薄荷醇含量<sup>[22-23]</sup>,并计算香精施加量。对于同一定量薄片、同一算法生产的烟芯棒,以6份样品检测的香精施加量平均值作为检测值。香精施加量检测结果见表3。

由表3可知,基于传统PID算法,使用5种不同定量薄片生产的烟芯棒,施加量检测均值与理论值的偏移率为0.45%~0.65%,施加量检测均值的组内波动为4.28%~5.06%。基于增量式PID算法,使用5种不同定量薄片生产的烟芯棒,施加量检测均值与理论值的偏移率为0.23%~0.52%,施加量检测均值的组内波动为3.11%~4.17%。由此可知,两种算法施加量检测均值与理论值的偏移均较小,但采用增量式PID算法的施加量检测均值更接近于施加量理论值;基于增量式PID算法的施加量检测均值的组内波动明显小于传统PID算法。以上结果表明,基于增量式PID算法的香精施加系统

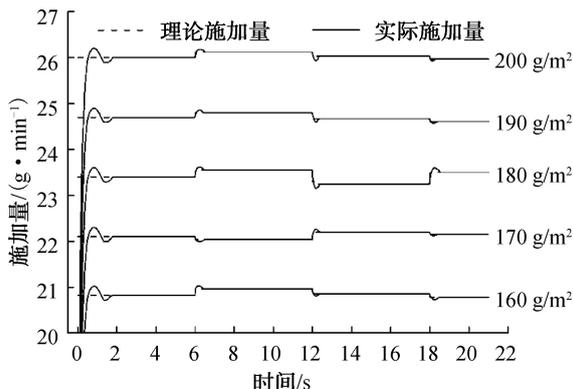


图8 不同定量薄片的香精施加量监控曲线

Fig. 8 Real-time curves of the flavor spray weight with different kinds of tobacco sheet

表3 香精施加量 GC-MS 检测结果  
Table 3 GC-MS analysis results of the spray weight

样品编号	薄片实际定量/(g·m <sup>-2</sup> )	施加量理论值/(mg·(120 mm) <sup>-1</sup> )	施加量检测均值/(mg·(120 mm) <sup>-1</sup> )		偏移率/%		组内波动/%	
			传统 PID 算法	增量式 PID 算法	传统 PID 算法	增量式 PID 算法	传统 PID 算法	增量式 PID 算法
1	160	125.50	124.83	125.92	0.53	0.33	5.06	3.89
2	170	133.30	133.97	133.60	0.50	0.23	4.28	4.17
3	180	141.10	142.02	141.83	0.65	0.52	4.41	3.90
4	189	148.90	148.14	149.38	0.51	0.32	4.71	3.11
5	199	156.70	157.41	156.12	0.45	0.37	4.83	3.47

控制性能优于传统 PID 算法的香精施加系统,香精施加更为准确、均匀、稳定。

## 4 结论

本文在分析烟芯棒生产工序流程基础上,结合香精喷雾特性,得出了施加量理论计算模型,确定了香精喷嘴及喷雾的关键参数;基于增量式 PID 算法,通过将采样周期内获取的薄片质量变化数据线性化近似处理,建立了薄片质量、香精施加量的闭环控制流程,完成了系统控制参数整定。在薄片定量(180±20) g/m<sup>2</sup> 范围内设计 5 个定量梯度,香精含量设定比例为 5%,香精飞溅量近似值为 0.35 g,对系统性能进行验证,发现针对 5 个定量薄片,当薄片质量发生变化时,基于增量式 PID 算法的香精施加系统能实现施加量快速调整,并趋于此周期内的理论施加量;系统最大超调量及最长调整时间均出现在香精施加初始阶段,系统最大超调量为 1%,最长调整时间为 1.8 s,系统具有较好的跟踪性能。施加量检测值与理论值的偏移率为 0.23%~0.52%,施加量组内波动为 3.11%~4.17%,系统可实现香精的准确、均匀、稳定施加。后续研究工作中将进一步提升香精施加量及施加精度的适用范围,以满足加热不燃烧烟草制品的生产需求。

## 参考文献:

- [1] 张丽,王维维,张小涛,等. 加热不燃烧卷烟气溶胶中主要成分的转移行为[J]. 烟草科技,2019,52(3):46-55.
- [2] 李朝建,饶先立,郑晓云,等. 不同工艺制备的加热卷烟烟草薄片热失重行为研究[J]. 轻工学报,2022,37(1):55-61.
- [3] 李朝建,吴承澄,罗亮,等. 加热卷烟烟芯材料及烟支的吸湿特性研究[J]. 中国造纸,2022,41(10):118-123.
- [4] 张珍祺,蒋成勇,朱景溯,等. 卷烟制丝加香工序加香均匀性及其影响因素研究[J]. 轻工学报,2019,34(6):48-55.
- [5] 吴秉宇,俞森文,费婷,等. 不同加香方式下细支卷烟中烟用香精转移行为研究[J]. 轻工学报,2022,37(5):91-97.
- [6] 付永民,范磊,方伟亚,等. 基于分级控制的烟丝加香系统设计[J]. 烟草科技,2017,50(8):97-102.
- [7] 张丽娜,许利平,樊虎,等. 高精度自动化加料加香烘丝一体化微型设备的研制和应用[J]. 中国烟草学报,2018,24(4):27-34.
- [8] 刘穗君,杨甦. 基于 PID 控制的烟丝加香控制系统改进[J]. 自动化应用,2015(7):32-34.
- [9] 张桂林,李锋,耿云飞. 基于增量式 PID 控制的空气热源泵供水机温度控制系统设计[J]. 计算机与数字工程,2021,49(2):268-271,321.
- [10] 何磊,梁健,俞嘉琳,等. 滴流床反应器内喷射型分布器的雾化和均布性能[J]. 石油化工,2021,50(10):1045-1051.
- [11] 李淑江,李程前,沈敏敏. 基于 FLUENT 的气液两相流喷嘴雾化性能研究[J]. 轻工机械,2021,39(6):81-85.
- [12] 钱俊兵,潘楠,潘地林,等. 两相流喷嘴雾化空间粒径分布研究[J]. 电子测量技术,2020,43(21):77-83.
- [13] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. On the modeling of liquid sprays impinging on surfaces[J]. Atomization & Sprays, 1998, 8(6):625-652.
- [14] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2):151-173.
- [15] 史春涛,周颖,张宝如,等. 喷雾模型的发展及其在内燃机 CFD 中的应用[J]. 拖拉机与农用运输车,2006,33(2):39-42.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

- [17] 宋安然,周德廉,刘艳梨. 基于增量式PID控制的锅炉温控系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 11-16.
- [18] 黄绪勇,王欣,唐标,等. 基于增量式PID算法的变电站设备巡检机器人控制系统研究[J]. 机械与电子, 2023, 41(8): 24-28.
- [19] 孙建民,刘祥,赵国浩,等. 模糊反馈增量式比例积分微分油气悬架控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14814-14820.
- [20] 张继成,严士超,纪文义,等. 基于增量式PID算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 99-106.
- [21] 高慧中,路骏,马小录. 基于增量式PID算法的气体流量控制方法[J]. 鱼雷技术, 2016, 24(2): 132-136.
- [22] 卢晓娟,何红梅,刘献军,等. 基于静态顶空-GC/MS的加热卷烟用滤嘴载香颗粒评价研究[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(1): 8-16.
- [23] 许蔼飞,章平泉,范忠,等. 用气相色谱法同时测定薄荷型卷烟滤嘴中的薄荷醇、三乙酸甘油酯和烟碱含量[J]. 轻工学报, 2018, 33(5): 53-59.

## Flavoring system design based on incremental PID algorithm

LUO Liang<sup>1</sup>, SHI Dongfang<sup>1</sup>, ZHU Xianyan<sup>1</sup>, ZONG Dongyue<sup>1</sup>, WANG Minghui<sup>1</sup>,  
WANG Pengfei<sup>1</sup>, JIN Qiang<sup>1</sup>, LI Chaojian<sup>2</sup>

1. R&D Center, Nantong Cigarette Filter Co., Ltd., Nantong 226001, China;

2. Technology Center, China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210019, China

**Abstract:** In order to solve the problem that the spray weight could not be adjusted and controlled according to the weight change of the tobacco sheet during the manufacturing process of heat-not-burn tobacco product in real time, a flavoring system was designed based on incremental PID algorithm. The flavoring system was composed of weighing unit, screw pumps, nozzles, and flow sensors. The weight of the tobacco sheet roll was obtained through the weighing unit in real time, then the spray weight was calculated according to the theoretical calculation model, and the screw pumps were driven to output target flow to the nozzles based on incremental PID algorithm, the real-time spray weight was got from the flow sensors, and at last tobacco flavor was sprayed on the tobacco sheet. The results showed that the spray weight could be adjusted and controlled according to the weight change of the tobacco sheet in real time, the maximum overshoot of the flavoring system was 1%, and the maximum adjustment time was 1.8 s, the system had good tracking performance. The deviation ratio of the spray weight was 0.23%~0.52% between the detection value and the theoretical value, the variation of the spray weight within samples was 3.11%~4.17%. It showed that the flavoring system could realize accurate, uniform and stable application.

**Key words:** heat-not-burn tobacco product; incremental PID algorithm; flavoring system; tobacco sheet

[责任编辑:吴晓亭]

(上接第99页)

specifications of vinegar fiber filter rod cigarettes, the increase in suction resistance of the composite filter rod cigarette sample was 12.33%, and the increase in filter nozzle ventilation rate and total ventilation rate were 10.17% and 10.22%, respectively; The release of conventional components and seven harmful components in the mainstream smoke of composite filter rod cigarette samples had been reduced, with nicotine decreased by about 36% and tar decreased by about 34%. The reduction effect of harmful components carbon monoxide, hydrogen cyanide, crotonaldehyde, and nitrosamine was more significant, with reductions of about 53%, 50%, 62%, and 78%, respectively. The hazard index of composite filter rod cigarette samples had decreased on average from 10.28 to 4.95, the designed graphene shaped filter rod component had a significant effect on reducing tar and harm.

**Key words:** cigarette; irregular filter rod component; graphene; tar and harm reduction

[责任编辑:王晓波]