



刘颖,刘穗君,冯凯迪,等.基于趋势预测和分区反馈的梗丝气流干燥出口含水率精准控制策略[J].轻工学报,2022,37(2):65-70.
LIU Y,LIU S J,FENG K D,et al.Precision control strategy of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying based on trend prediction and partition feedback[J].Journal of Light Industry,2022,37(2):65-70.
DOI:10.12187/2022.02.009

基于趋势预测和分区反馈的梗丝气流干燥出口含水率精准控制策略

刘颖¹,刘穗君¹,冯凯迪¹,李超²,杨光露¹,王海宇³

1. 河南中烟工业有限责任公司 南阳卷烟厂,河南 南阳 473007;
2. 河南中心线电子科技有限公司,河南 郑州 450004;
3. 郑州大学 商学院,河南 郑州 450001

摘要:针对梗丝气流干燥出口含水率稳定性不足的问题,在原有PID控制模型基础上,设计了趋势预测调整控制与分区反馈调整控制相结合的整合控制模型。该模型将出口含水率的实际值与设定值的偏差分为多个不同的区间,根据偏差所处的区间及在区间内变化趋势的分析结果确定实时调控策略,同时根据来料含水率的变化趋势预测出口含水率的变化并采取修正措施。实际应用结果表明,梗丝气流干燥出口含水率标准偏差降低了27.9%、短期过程能力指数提高了45.4%,该控制模型可有效提高梗丝气流干燥出口含水率的稳定性。

关键词:趋势预测;分区反馈;梗丝气流干燥;出口含水率

中图分类号:TS452;TP273 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2022)02-0065-06

0 引言

烟梗是卷烟生产的重要原料之一,鉴于其理化特性与烟叶存在明显的区别,须采用单独工艺进行加工处理^[1]。梗丝膨胀干燥是控制成品梗丝含水率的关键工序,目前该工序广泛采用的设备类型主要是气流式干燥机^[2],相较于滚筒式加工模式,气流式干燥具有更好的加工效果^[3]。在生产实践中,常使用梗丝低速气流干燥机进行梗丝干燥^[4],其中含水率的波动通过PID进行反馈控制,但存在响应速度较慢、控制不及时、过程能力偏低等问题,梗丝

质量稳定性得不到保障^[5-6]。近年来,关于梗丝气流干燥在实际应用过程中出现的出口含水率稳定性不足问题,其相关研究主要集中在设备改造和控制模式优化两个方面^[7-8]。对于设备,研究者们分别对进料管、匀风装置、干燥管道等相关干燥设备进行改造以提升控制效果^[9-11];而在控制模式方面,杨艳阳等^[12]通过调整出口水分仪检测点位置、在风送工序出口的落料器上安装计量管、优化PID控制程序等方式,对出口含水率的控制模式进行了优化;任志军等^[13]针对烘梗丝过程的不确定性、非线性及存在大滞后等特点,提出了一种基于模糊控制和PID控

收稿日期:2021-06-16;修回日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(71672209);河南中烟工业有限责任公司科技项目(ZW201735)

作者简介:刘颖(1991—),女,河南省南阳市人,河南中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为卷烟工艺技术。E-mail:543112146@qq.com

通信作者:王海宇(1979—),男,山西省晋城市人,郑州大学教授,博士,主要研究方向为质量管理和工程技术。E-mail:45211474@qq.com

制相结合的控制策略。上述研究中设备改造对于出口含水率稳性的提升非常有限,控制模式优化则大多都是对原有 PID 控制模式进行的改进,能够在一定程度上改善梗丝干燥工序出口含水率控制的响应速度和稳定性,但依旧无法解决 PID 控制模式单一,且存在超调、振荡、控制滞后等不足的问题。业界也有不少新的控制策略研究,如刘穗君等^[14]在松散回潮工序采用统计回归的方法构建了基于来料含水率变化趋势的预测分析模型;石东宝^[15]在物流路径优化中采用分区段反馈控制的方法提高控制系统的响应速度和准确性等,但在梗丝气流式干燥工序还未见相关应用研究。基于此,本文采用分区反馈控制的方式进一步提高对干燥机出口含水率偏差的响应能力,同时结合对来料含水率变化趋势的预测分析,在原有的 PID 反馈控制的基础上构建前、后反馈相结合的控制模型,以提高梗丝气流干燥出口含水率稳定性的控制能力。

1 问题的提出

卷烟厂梗丝干燥工序普遍使用的 SH23A 型梗丝低速气流干燥机主要以蒸汽为热源,通过热风为梗丝提供水分蒸发的热量并带走梗丝蒸发产生的水蒸气,热风风门的风量大小主要由风门气动薄膜阀的开度值决定,因此可将其作为气流干燥出口含水率的控制量。生产过程中出口含水率的实时数据由出口水分仪传输给 PID 控制程序,根据出口含水率实际值与目标值的偏差计算实时控制量,自动调整热风风量,以实现对外出口含水率的调节。在实际应用中,梗丝干燥工序的控制精度往往不高,出口含水率波动频繁,合格率偏低,究其原因,主要来自两个方面:一是 PID 控制本身调整较为缓慢,容易出现滞后和振荡;二是来料含水率波动较大,仅根据出口含水率的偏差进行调整不够准确。因此,有必要对原有的控制模式进行优化设计。

2 控制模型的优化设计

本文采用趋势预测的方法对出口含水率进行预先调整;而针对 PID 控制调整缓慢的问题,则采用分区精准反馈控制加以改进。

2.1 分区精准反馈控制

出口含水率实际值与出口含水率设定值的偏差

可以表示为

$$E(k) = y(k) - T$$

其中, $y(k)$ 为 k 时刻出口含水率实际值, T 为 k 时刻出口含水率设定值。

分区精准反馈控制的基本思想是对偏差 $E(k)$ 的取值进行分区,在不同分区内,采用不同程度的调整方式来快速响应出口含水率的偏差。以出口含水率的设定值 T 为中心, ± 0.1 为中间区 A 区,在此区间时干燥机出口含水率控制量保持不变; $0.1 \sim 0.3$ 区域为 B 区, $-0.1 \sim -0.3$ 区域为 -B 区; $0.3 \sim 0.5$ 区域为 C 区, $-0.3 \sim -0.5$ 区域为 -C 区;超出 0.5 区域为 D 区,超出 -0.5 区域为 -D 区(见图 1)。

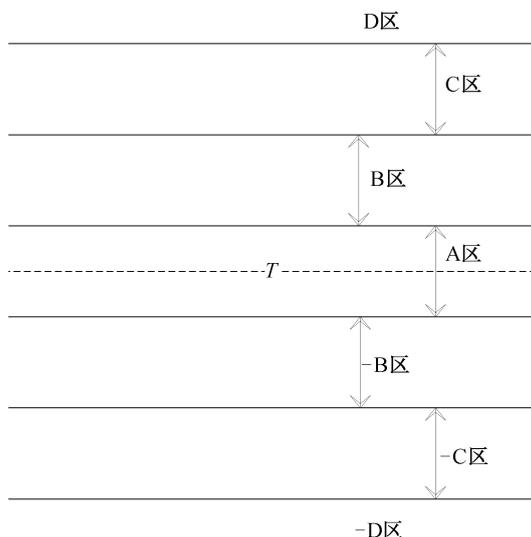


图 1 出口含水率分区控制图

Fig. 1 Partition control chart of outlet moisture content

为了获得准确的调整幅度,采用统计回归分析的方法进行优化设计。以 B 区为例,选取实际生产过程中出口含水率处于 B 区和 -B 区且对控制量进行了调整的数据,分别确定每次控制量的变化值与对应的控制结果(用控制量变化时刻点 1 min 后连续 10 次的采样值与出口含水率设定值的差来计算),共收集 50 组进行控制量变化值与控制结果的回归分析,见图 2。

由图 2 可知,当控制量变化值为 2 时,控制结果的值最小,大约为 0.03~0.07。控制结果越小,说明出口含水率实际值与设定值越接近,因此在 B 区时,控制量的变化值选择 2 是最优的。按照同样的方式可以得到其他分区的控制量变化程度的最优取

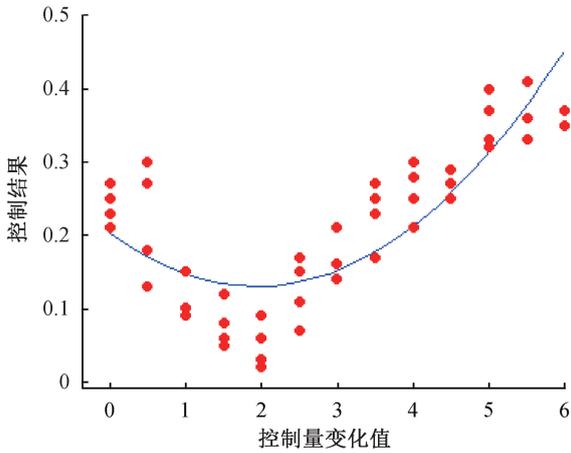


图2 控制量变化值与控制结果的回归分析
Fig. 2 Regression analysis of control quantity change value and control result

值,并由此得出以下分区反馈控制策略。

B区规则:若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 B 区,则干燥机出口含水率控制量减少 2;若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 -B 区,则干燥机出口含水率控制量增大 2。

C区规则:若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 C 区,则干燥机出口含水率控制量减少 4;若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 -C 区,则干燥机出口含水率控制量增大 4。

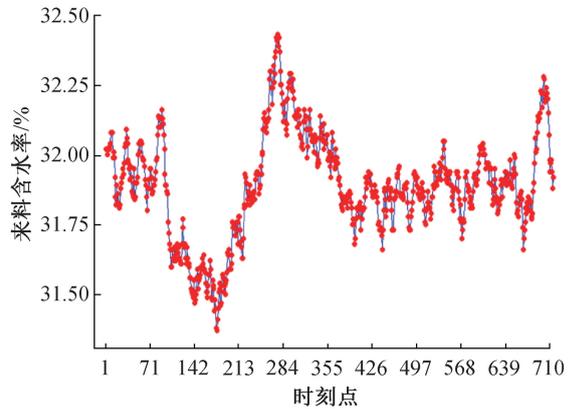
D区规则:若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 D 区,则干燥机出口含水率控制量减少 7;若 $E(k)$ 、 $E(k+1)$ 和 $E(k+2)$ 连续 3 个点都在 -D 区,则干燥机出口含水率控制量增大 7。

由于存在调整延迟,因此在根据上述规则进行调整后 1 min 内,若出现满足同一规则的情况,不进行调整;若出现满足更高规则(D 高于 C,C 高于 B)的情况,则按高规则进行调整并重新计时;1 min 后不再计时,满足任意规则都需要进行调整。

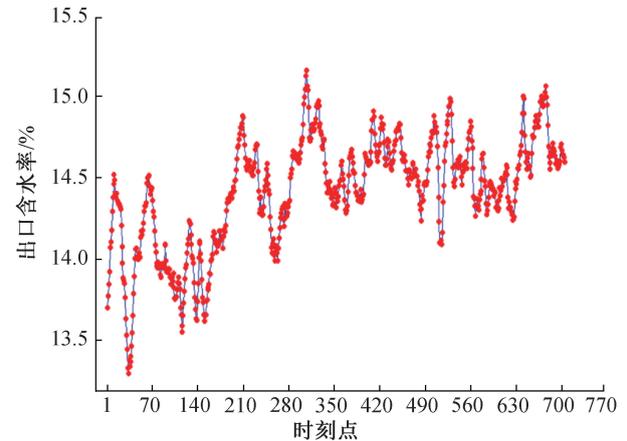
2.2 趋势预测控制

梗丝气流干燥来料含水率的变化也是影响出口含水率稳定性的一个重要影响因素,来料含水率若出现较大程度的波动将不可避免地造成出口含水率的变化。图 3 为来料含水率与出口含水率的时间序列图。

从图 3 可以看出,来料含水率的连续增大或减小会造成出口含水率的整体升高或降低,比如来料



a) 来料含水率



b) 出口含水率

图3 来料含水率与出口含水率的时间序列图

Fig. 3 Time series plots of inlet and outlet moisture content

含水率从第 71 个时刻点开始出现连续下降的趋势,来料含水率从 32.10% 快速下降到 31.50%,导致对应的出口含水率从第 73 个时刻点的 14.5% 下降到 121 个时刻点的 13.6%,并在 13.8% 左右持续振荡;来料含水率在第 164 个时刻点的 30.78% 连续上升至第 280 个时刻点的 32.33%,导致对应的出口含水率从第 168 个时刻点的 13.7% 上升到第 303 个时刻点的 15.2%。虽然通过 PID 控制器的调整一定程度上降低了来料含水率的变化带来的出口含水率的波动,但整体影响趋势仍未消除。因此,有必要根据来料含水率的趋势性变化及时地对出口含水率的控制参数进行更快速地调整,而当来料含水率仅出现一些偶然性或缓慢性的随机波动时则不需要进行调整。

为了识别来料含水率的趋势性变化,可令 $d(t)$ 为每个采样时刻的来料含水率 $x(t)$ 与前一个采样

时刻的来料含水率 $x(t-1)$ 的差,即

$$d(t) = x(t) - x(t - 1)$$

参考符号 (Sign) 控制图的构造方法^[16-17], 根据 $d(t)$ 的取值, 构造采样时刻 t 的示性函数 $SN(t)$:

$$SN(t) = \begin{cases} 1 & d(t) \geq 0 \\ -1 & d(t) < 0 \end{cases}$$

按照控制图判异准则中趋势性偏移的判别方式^[18], 可以通过分析连续多个采样点的总体情况来识别来料含水率的波动, 令 $Z(t)$ 为 t 时刻及前 6 个时刻的 SN 值之和:

$$Z(t) = \sum_{i=0}^6 SN(t - i)$$

由此可以得出以下趋势预测控制策略:

- 1) 若 $Z(t) > 3$, 说明来料含水率有增大的趋势, 可将干燥机出口含水率控制量减少 1;
- 2) 若 $Z(t) < -3$, 说明来料含水率有减小的趋势, 可将干燥机出口含水率控制量增大 1;
- 3) 若 $-3 \leq Z(t) \leq 3$, 说明来料含水率没有趋势性变化, 出口含水率控制量不做调整。

2.3 整合控制模型

在原有 PID 控制模型基础上, 结合分区精准反馈控制与趋势预测控制策略, 形成了图 4 所示梗丝气流干燥的整合控制模型。

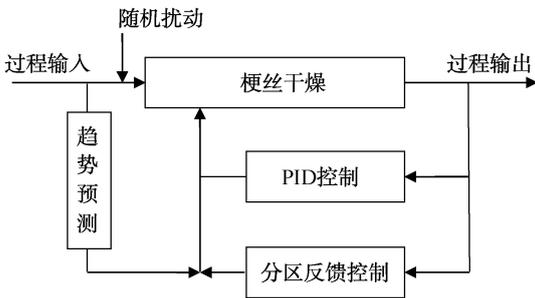


图 4 梗丝气流干燥的整合控制模型
Fig. 4 Control model of tobacco cut stem airflow drying

首先, 以梗丝气流干燥工序的来料含水率作为过程输入, 通过对来料含水率变化趋势的预测进行含水率的前馈控制; 而后, 在工序生产过程中, 以梗丝气流干燥工序的出口含水率作为过程输出, 根据出口含水率的变化进行 PID 反馈控制, 以确保出口含水率的稳定性; 最后, 根据出口含水率实际值的偏移程度, 通过分区控制的方法来减小其与目标值的偏差。这 3 种控制方式同步运行, 通过来料含水率

的趋势性分析实现对干燥机内物料含水率的预先控制, 通过 PID 控制实现出口含水率控制的连续性和稳定性, 通过分区精准控制有效降低出口含水率的误差。

3 实际应用效果

为了验证整合控制模型的有效性, 以南阳卷烟厂在产梗丝为验证对象, 在该厂的气流式梗丝干燥设备上, 对整合控制模型应用前后的出口含水率数据进行比较分析。设定物料流量 2000 kg/h, 闪蒸蒸汽流量 650 kg/h, 混合风温 200 °C, 出口含水率的检测采用 TM710e 在线烟草水分仪, 数据采集间隔为 6 s。从第 350 个时刻点开始应用整合控制模型, 控制模型应用前后的数据趋势分析结果如图 5 所示。

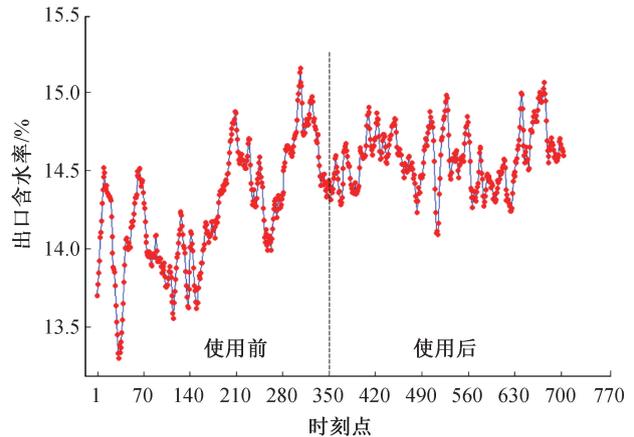


图 5 控制模型应用前后的数据趋势分析
Fig. 5 Data trend analysis before and after application of control model

由图 5 可以看出, 模型应用前, 出口含水率的实际值存在较大幅度的连续性变化, 这是由于仅采用 PID 控制难以对生产过程中的变化情况及时做出响应, 这种响应延迟造成了出口含水率持续向一个方向变化(连续增大或减小), 进而形成了连续的过程振荡; 而模型应用后, 通过分区精准控制和对来料含水率的趋势预测, 实现了对过程变化的快速响应和准确调控, 过程波动显著减小, 过程质量稳定性得到明显的提高。选取该控制模型应用前后各 10 个批次梗丝气流干燥工序的出口含水率数据, 分别计算 20 个批次出口含水率的均值、方差、极差、短期过程能力指数 CPK 等过程质量指标, 进一步比较分析多个批次的出口含水率变化情况, 结果如表 1 所示。

表1 模型应用前后梗丝气流干燥出口含水率比较分析

Table 1 Comparative analysis of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying before and after application of the model

批次	应用前					应用后				
	均值/%	偏移量/%	标准偏差/%	极差/%	CPK	均值/%	偏移量/%	标准偏差/%	极差/%	CPK
1	14.41	0.09	0.339	2.36	0.89	14.58	0.08	0.220	1.75	1.39
2	14.27	0.23	0.297	1.98	0.86	14.43	0.07	0.211	1.69	1.47
3	14.62	0.12	0.304	1.94	0.96	14.37	0.13	0.205	1.57	1.41
4	14.33	0.17	0.285	1.63	0.97	14.64	0.14	0.218	1.81	1.31
5	14.38	0.12	0.302	2.05	0.97	14.52	0.02	0.207	1.73	1.58
6	14.29	0.21	0.220	1.69	1.20	14.40	0.10	0.239	1.93	1.26
7	14.66	0.16	0.241	1.97	1.16	14.44	0.06	0.197	1.66	1.60
8	14.35	0.15	0.285	2.01	0.99	14.62	0.12	0.204	1.78	1.44
9	14.42	0.08	0.318	2.23	0.96	14.37	0.13	0.185	1.54	1.57
10	14.64	0.14	0.307	1.93	0.93	14.54	0.14	0.202	1.63	1.42
平均值	14.44	0.15	0.290	1.98	0.99	14.49	0.10	0.209	1.71	1.44

由表1可以看出,梗丝气流干燥出口含水率的平均偏移量从模型应用前的0.15%降低到模型应用后的0.10%,降低了33.3%;含水率标准偏差从模型应用前的0.290%降低到应用后的0.209%,降低了27.9%;极差从模型应用前的1.98%减少到应用后的1.71%,降低了13.6%;CPK从模型应用前的0.99提高到应用后的1.44,提高了45.4%。对多个批次整体控制效果的比对分析结果表明,分区反馈和趋势预测的引入有效提高了梗丝气流干燥工序对出口含水率的控制能力,可有效提高梗丝气流干燥工序的控制精度。同时,在生产实践过程中,整合控制模型的应用还减少了操作人员凭经验实施的人为主观干扰可能造成的质量隐患。

4 结论

本文在已有工业自动控制的基础上,运用统计分析和智能控制技术,采用分区反馈控制的方式进一步提高了对干燥机出口含水率偏差的响应能力,同时结合对来料含水率变化趋势的预测分析,在原有的PID反馈控制的基础上构建了前、后反馈相结合的整合控制模型。以南阳卷烟厂在产梗丝为对象,对整合控制模型应用前后的出口含水率控制效果进行比对验证,出口含水率的平均偏移量、标准偏差和极差等指标都显著下降,过程能力指数明显提升。

本文研究梗丝气流干燥出口含水率精准控制策

略过程中形成的技术路线,同样可为其他类似控制模式的工序提供借鉴,在烟草制丝线智能质量控制中具有较好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 周雅宁. 烟梗加工处理技术与设备研究进展[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(2): 121-129.
- [2] 许永明, 朱明, 龙明海, 等. 烟梗蒸汽增压回潮工艺参数优化[J]. 烟草科技, 2018, 51(12): 85-92.
- [3] 姚二民, 周利军, 李晓, 等. 干燥方式对微波膨胀烟梗梗丝综合质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 145-147.
- [4] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.
- [5] 刘强, 姚光明, 李春光, 等. 节能型梗丝低速气流干燥机研发与应用评价[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(2): 29-33.
- [6] 袁书豪. 级联型PID控制在梗丝气流干燥控制系统的应用[J]. 设备管理与维修, 2017(4): 60-61.
- [7] 王鹏飞, 李全胜, 陈孟起, 等. 微波膨胀烟梗制丝关键工艺参数对梗丝加工质量的影响[J]. 轻工学报, 2021, 36(6): 55-64.
- [8] 张二强, 堵劲松, 江家森, 等. 基于OpenFOAM大规模并行计算的烟草气流干燥装置中气固

- 流动数值模拟[J]. 烟草科技, 2017, 50(4): 72-78.
- [9] 李少平, 王秋领, 范磊, 等. 梗丝低速气流干燥设备的设计与应用[J]. 烟草科技, 2012(12): 22-25.
- [10] 姚光明, 李春光, 刘强, 等. 低速气流干燥工艺参数对梗丝加工质量的影响[J]. 烟草科技, 2013(9): 10-20.
- [11] 高玉梅, 李辉, 孙革, 等. 新型叶丝、梗丝高膨胀干燥设备的设计应用[J]. 烟草科技, 2008(10): 12-15.
- [12] 杨艳阳, 苏国寿, 任淑本. 梗丝气流干燥出口含水率控制模式的优化设计[J]. 烟草科技, 2016, 49(6): 100-104.
- [13] 任志军, 李爱莲. 模糊控制在烟草梗丝干燥控制中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(6): 83-85.
- [14] 刘穗君, 王玉芳, 李超, 等. 基于统计回归分析的松散回潮出口含水率精准控制系统[J]. 烟草科技, 2017, 50(3): 88-93.
- [15] 石东宝. 基于 PLC 的磁导航 AGV 纠偏控制方法的研究[D]. 银川: 北方民族大学, 2020.
- [16] CELANO G, CASTAGLIOLA P, CHAKRABORTI S, et al. On the implementation of the Shewhart sign control chart for low volume production [J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(19): 5886-5900.
- [17] ASLAM M, RAZA M, AZAM M, et al. Design of a sign chart using a new EWMA statistic [J]. Communications in Statistics, 2020, 49(4): 1299-1310.
- [18] 熊伟. 现代质量管理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.

Precision control strategy of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying based on trend prediction and partition feedback

LIU Ying¹, LIU Suijun¹, FENG Kaidi¹, LI Chao², YANG Guanglu¹, WANG Haiyu³

1. Nanyang Cigarette Factory, China Tobacco He'nan Industrial Co. Ltd., Nanyang 473007, China;

2. He'nan Center Line Electronic Science and Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450004, China;

3. Business School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Aiming at the problem of insufficient stability of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying, an integrated model combining trend prediction adjustment control and zoning feedback adjustment control was designed based on the original PID control model. The gap between the actual value and the set value of outlet moisture content was divided into several different intervals in this model, and a real-time control strategy was determined by the interval of gap lied in and the change trend in the interval. At the same time, according to the change trend of inlet moisture content, the change of outlet moisture content was predicted and necessary adjustments were taken. The practical application research results showed that the standard deviation of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying was reduced by 27.9% after applying the integrated control model, CPK increased by 45.4%. The integrated control model could effectively improve the stability of outlet moisture content in tobacco cut stem airflow drying.

Key words: trend prediction; partition feedback; tobacco cut stem airflow drying; outlet moisture content

(责任编辑:吴晓亭)