

基于 MFA-SM 下细支卷烟烟丝含水率 自动控制系统设计

王海龙, 张志勇, 王新辉, 栾松年, 朱 岩, 马相女

(山东中烟工业有限责任公司 青岛卷烟厂, 山东 青岛 266101)

摘要: 烟丝含水率是影响卷烟品质和口感的重要参数之一, 过高或过低的烟丝含水率都会导致卷烟燃烧不良、口味差异较大等问题; 为了有效地提高卷烟产品的质量稳定性, 基于 MFA-SM 设计一种细支卷烟烟丝含水率自动控制系统; 该系统框架有三层, 即 MFA-SM 前端采集层、中间层以及终端控制层; 设计系统硬件, 包括水率数据采集设备、MFA-SM 控制器、驱动器、微雾加湿器与干燥设备; 利用水分仪采集烟丝含水率, 并利用无线射频模块将数据传输给 MFA-SM 控制器, 控制器运行双环控制模块中的内环为滑模控制模块, 用于计算干燥设备控制参数, 外环为无模型自适应控制模块, 用于计算微雾加湿器控制参数; 根据控制参数控制干燥设备和微雾加湿器运行, 实现烟丝含水率自动控制; 实验结果表明, 设计系统应用下, 含水率误差低于 0.3%, 拟合优度为 0.952, 具有更好的控制效果。

关键词: MFA-SM; 细支卷烟; 烟丝含水率; 自动控制系统

Design of Automatic Control System for Moisture Content of Fine Tobacco in Cigarettes Based on MFA-SM

WANG Hailong, ZHANG Zhiyong, WANG Xinhui, LUAN Songnian, ZHU Yan, MA Xiangnü
(Qingdao Cigarette Factory, China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Qingdao 266101, China)

Abstract: The moisture content of tobacco is one of the important parameters affecting the quality and taste of cigarettes, and high or low moisture content can lead to issues such as poor combustion and significant variations in taste. In order to effectively control the stability of tobacco moisture content and improve the quality consistency of cigarette products, an automatic control system for the moisture content of fine tobacco in cigarettes based on model free adaptive-sliding mode (MFA-SM) is designed. The system framework consists of three layers: the MFA-SM front-end acquisition layer, intermediate layer, and terminal control layer. The hardware of the system includes the moisture data collection equipment, MFA-SM controller, driver, mist humidifier, and drying equipment. the moisture analyzer is used to collect the moisture content of tobacco, and transmit the data to the MFA-SM controller via a wireless RF module. The controller runs a dual-loop control module, with the inner loop being a sliding mode control module, calculates the control parameters for the drying equipment, and the outer loop is a model-free adaptive control module for calculating the control parameters for the mist humidifier. The drying equipment and mist humidifier are controlled based on these parameters to achieve the automatic control of tobacco moisture content. Experimental results show that under the application of the designed system, the moisture content error is less than 0.3%, and the goodness of fit is 0.952, indicating its better control effectiveness.

Keywords: MFA-SM; fine cigarette; moisture content of tobacco; automatic control system

0 引言

卷烟是一种需求量较大的消费品, 且种类较多。相比其他卷烟产品, 细支卷烟可以提供更好的过滤效果, 烟气浓度相对较低, 同时在使用时可以减少烟头部分的

烟失情况, 提高了卷烟的利用率。为此, 细支卷烟被广泛使用。其制作有一套较为复杂的流程, 烘丝就是其中之一。在烘丝程序中对卷烟烟丝的含水率有着较高的要求, 含水率也会直接影响卷烟的质量, 也会直接影响香气和吸味特性。具体可以从两个方面分析: 1) 当烟丝

收稿日期:2024-01-12; 修回日期:2024-02-27。

作者简介:王海龙(1978-),男,大学本科,工程师。

引用格式:王海龙,张志勇,王新辉,等. 基于 MFA-SM 下细支卷烟烟丝含水率自动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4):102-108,129.

的含水量过高时,会降低烟丝的香味,使得卷烟变得“吸之无味”;2)而当烟丝的含水量过低时,会增加卷烟干燥刺激程度,吸烟时会大大降低吸烟者的感官体验,同时也会加快卷烟的燃烧速度^[1-3]。对于卷烟制造商来说,保持烟丝含水率在稳定的范围内有助于确保卷烟的一致性。面对这种情况,对细支卷烟烟丝含水量进行严格控制是十分必要的。

为提高卷烟生产质量,对卷烟含水量控制设计了很多控制系统用于调控。例如,文献[4]中在原有送新风系统的基础上设计了一种加湿控制系统,该系统以湿度传感器检测到烟丝湿度数据为基础,当烟丝含水率超过预期标准时,就会启动控制程序。依据水蒸气质量守恒原理计算加湿量,根据加湿量参数控制微雾加湿器和新风系统进行湿度调节,以期让烟丝含水率达到预期标准。然而在测试中发现该系统的控制稳定性较差。文献[5]中以补偿加水为机制的含水率调控系统。利用多元回归分析方法对烟丝的含水率变化情况进行预测,与水分析仪检测出来的实际含水率进行对比,并计算二者之间的偏差,采用主辅 PID 联动控制方式计算加水补偿量,实现烟丝含水率调控。该控制系统的缺点是自适应调节能力较差。文献[6]中提出了一种综合控制模型。通过建立滑窗来进行烟丝来料含水率预测,构建 PID 前馈和 EWMA 反馈相结合的综合控制模型,以预测出的来料含水率为输入,通过控制模型的计算得出排潮阀门开度值,以此实现出口含水率稳定性的控制。该控制方法存在一定的反应滞后性。

无模型自适应滑模(MFA-SM, model free adaptive-sliding mode)系统融合了无模型自适应控制和滑模控制两种控制技术,通过结合内外环控制技术,能够对烟丝含水率进行及时调节,确保系统在各种工作状态下都能维持稳定的运行,降低了系统出错的概率,使烟丝的含水率可以在目标水平上稳定波动,从而提高产品质量和一致性。为此,设计一种基于 MFA-SM 的细支卷烟烟丝含水率自动控制系统。以 FA-SM 前端采集层、MFA-SM 中间层和 MFA-SM 终端控制层设计 MFA-SM 自动控制系统框架,将不同任务分配给不同模块,可以使每个模块专注于自己的任务,提高任务的执行效率和数据处理准确性。以 STM32F373RCT6 作为 MFA-SM 控制程序的载体、利用 TK100T 烟草水分仪采集实际含水率数据的传感器设备、使用 nRF24L01 芯片作为无线射频模块核心装置、以 STM32F373RCT6 为 CPU 处理器、通过 SDC9301 驱动器接收 MFA-SM 控制器转换后的控制指令、采用微雾加湿器与干燥设备控制含水率,具有稳定的性能和良好的可靠性,能够长时间稳定地工作,实现对烟丝含水率的自动调节和控制,提高生产效率和产品质量。基于此,设计由 MFA-SM 控制数

据预处理单元、无线通信传输单元和 MFA-SM 控制实现单元组成的软件系统,自动计算控制参数并控制相关设备执行命令,进一步提高烟丝生产的质量。通过本次研究以期提高烟丝含水率控制水平,改善卷烟烘丝工作质量。

1 基于 MFA-SM 的自动控制系统设计

烟丝含水率直接关系到细支卷烟的制作品质^[7-8]。为保证烟丝含水率能够达到预期标准,设计一种基于 MFA-SM 的自动控制系统。该系统设计主要分为 3 部分,即 MFA-SM 自动控制系统框架设计、MFA-SM 控制硬件及 MFA-SM 控制软件,如图 1 所示。

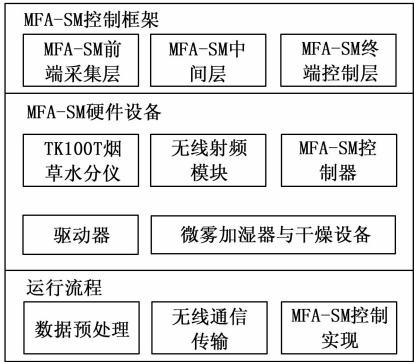


图 1 细支卷烟烟丝含水率自动控制系统总体框架

本次研究中,利用 FA-SM 前端采集层、MFA-SM 中间层和 MFA-SM 终端控制层完成 MFA-SM 控制框架的设计,采集并传递数据信息,以此实现含水率自动控制。通过无线射频模块、网关、A/D 转换模块等完成数据包的打包和解析,保证数据在传输过程中的完整性和正确性。结合无模型自适应控制(MFA)和滑模控制(SM)方法,MFA 通过自适应调整微雾加湿器喷水量参数,控制含水率在预期范围内;SM 通过滑模控制烟丝烘干设备,实现干燥处理。这种控制方法具有良好的响应速度和抗干扰能力,以此实现细支卷烟烟丝含水率自动控制。下面针对各个设计部分进行具体分析。

1.1 MFA-SM 自动控制系统框架设计

MFA-SM 自动控制系统的核心任务是让细支卷烟烟丝含水率保持在预期水平。围绕这一核心任务以多种相关物理硬件为载体,以软件程序为运行逻辑,构建 3 层系统框架。3 层结构每一层所负责的工作为:

- 1) MFA-SM 前端采集层:采集烟丝含水率数据,为后续控制参数的求取提供依据。
- 2) MFA-SM 中间层:实现采集层与控制层之间的交互与通信^[9],促进数据传递。
- 3) MFA-SM 终端控制层:利用 MFA-SM 控制器计算控制参数,通过控制参数调节烟丝含水率的影响因素,实现含水率自动控制。

1.2 MFA-SM 自动控制系统硬件设计

MFA-SM 控制的实现需要依赖各种物理设备。本研究中以 STM32F373RCT6 作为 MFA-SM 控制程序的载体^[10], 外部连接多个关联设备, 构建一个完整的 MFA-SM 控制硬件体系。为了提高系统控制精度, 使用 TK100T 烟草水分仪进行实时含水率数据采集, 采用高性能的 STM32F373RCT6 作为核心控制器, 实现对烟丝含水率的精确控制。通过无线射频模块建立通信连接, 实时传输含水率数据和控制指令, 保证系统的响应速度。选择灵活多接口的 STM32F373RCT6 微处理器, 支持多种外部设备的连接, 使设计系统更具灵活性和可扩展性。以烟草水分仪、无线射频模块、驱动器等提高系统的控制稳定性。

MFA-SM 控制实现的前提是获取当下时刻细支卷烟烟丝的实际含水率数据。MFA-SM 控制器是以实际含水率与预期含水率标准之间的差值为输入, 通过计算得出控制参数^[11-12]。通过检测水分的传感器直接进行测量, 所选择的传感器设备为烟草水分仪, 该仪器是基于电阻与含水率之间的负相关关系获取数据, 仪器的电导探头对含水量变化十分敏感, 含水量越高, 其电阻越小。烟草水分仪型号选择 TK100T, 该仪器具有测量范围宽、精确度高、分辨力强、测量迅速、性能稳定和安装方便的优点, 可在现场实现快速检测。

在完成含水率数据采集之后, 需要将其传输给控制器进行下一步的运算。为此, 以无线射频模块作为通信设备, 在 TK100T 烟草水分仪与 MFA-SM 控制器之间建立通信连接, 实现信息传递。该无线射频模块以 nRF24L01 芯片为核心, 具有强大的 32 位 ARM Cortex-M4FCPU、1 MB 闪存、256 kB RAM 和集成 2.4 GHz 收发器; 内置 PA/LNA, 1 Mbps 速率下通信传输时间很短, 距离最远可达 600 m, 满足多点通信和跳频通信需要, 具有体积小、功耗低、传输距离远和抗干扰能力强等优点。

借助无线射频模块将采集到的含水率数据传输到 MFA-SM 控制器^[13]。在 MFA-SM 控制器的应用下, 将含水率控制参数转换为控制指令, 实现烟丝喷水或烘干处理。MFA-SM 控制器以 STM32F373RCT6 为 CPU 处理器, 并在其中编辑 MFA-SM 控制程序, 外围连接各种外围硬件, 组成一块主控板, 结构如图 2 所示。

该控制器拥有 Cortex-M4 内核的 32 位 ARM 微处理器, 支持多串口, 多 USB 接口, 支持多 PCIe、PCI 多总线扩展, 具备丰富的外部接口, 能广泛应用于多模块控制中。

将经过 MFA-SM 控制器转换后的控制指令传递给驱动器, 通过驱动器作用带动烟丝加工现场工作, 进行烟丝含水率调节。驱动器属于执行设备, 安装在 MFA-

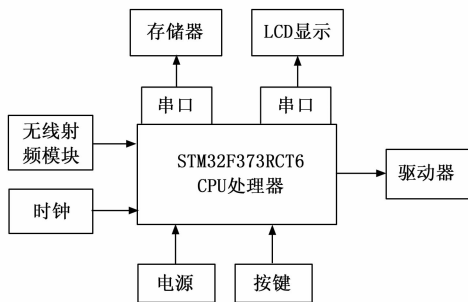


图 2 MFA-SM 控制器硬件结构图

SM 控制器和马达的中间。本系统中的 SDC9301 驱动器是具有脉冲宽度调制 (PWM) 功能的直流电机驱动器^[14], 拥有独立的上下驱动通道, 其峰值输出电流为 $\pm 3.5\text{ A}$, 工作电压上限为 40 V , 能够最小化输出直通的影响, 同时通过外加 PWM 信号到相应输入脚, 控制直流电机的速度和方向, 同时内部同步整流电路降低芯片功耗。

驱动器和微雾加湿器与干燥设备相连, 当含水率低于预期水平时, 在 MFA-SM 控制下驱动器驱动微雾加湿器进行喷水, 提高烟丝的含水率; 当含水率高于预期水平时, 在 MFA-SM 控制下驱动器驱动干燥设备进行干燥, 降低烟丝的含水率。其中, 微雾加湿器采用特制的电机和离心雾化装置^[15], 将水雾化为 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 的超微粒子, 通过风动装置, 实现每小时 50 L 的超大出雾量。将水雾扩散到空气中, 达到均匀加湿烟丝的目的。烟丝烘干设备可根据烟丝的干燥特性设计成不同的热风循环干燥形式, 是热风循环烘箱的延伸和改进, 同时配备高灵敏度感温探头, 实时监控烘干温度, 防止烘干温度过高损伤烟丝, 具有高效、节能、温度自控等优势。

1.3 MFA-SM 自动控制系统软件设计

系统软件是系统硬件的运行逻辑。将软件划分为 3 个单元, 即 MFA-SM 控制数据预处理单元、无线通信传输单元、MFA-SM 控制实现单元。通过数据预处理的滤波处理和异常数据消除与填补, 可以有效提高含水率数据的准确性和完整性, 为后续的控制提供高质量的数据基础; 采用无线通信传输单元, 远程传输含水率数据, 提高系统的便捷性; 将无模型自适应控制和滑模控制两种控制模型有效地结合在一起, 有效提高烟丝含水率控制的精准度。针对 3 个单元的运行程序进行具体分析。

1.3.1 MFA-SM 控制数据预处理单元

1.3.1.1 MFA-SM 输入数据的滤波处理

为保证 MFA-SM 控制参数求取结果的准确性, 采集的含水率数据必须是准确的。TK100T 烟草水分仪以电信号的形式输出^[16-17], 而电信号在采集转换过程一定存在噪声, 为此以小波变换算法为基础进行滤波:

步骤 1: 对含水率电信号进行分解。

1) 输入待滤波的含水率电信号, 记为 $p^{(t)}, t = 1, 2, \dots, T$ 。从含水率电信号 $p^{(t)}$ 中找出所有极值点。当 $t > t \pm 1, t$ 时刻的含水率信号是极大值点, 当 $t < t \pm 1, t$ 时刻的含水率信号是极小值点。

2) 拟合极值点得到两条包络线, 上包络线和下包络线分别为 $p_{up}^{(t)}, p_{down}^{(t)}$ 。计算 $p_{up}^{(t)}, p_{down}^{(t)}$ 之间的均值。将原始含水率电信号与计算出的均值进行相减, 得到一个新序列 $q^{(t)}$ 。若其中有且只有一个过零点和极值点, 以及上、下包络线的平均值为零, 找到第一个 IFM 分量—— $q^{(t)}$ 。否则回到求取极值点步骤, 重新开始上述过程, 继续寻找, 直至找到第一个 IFM 分量—— $q^{(t)}$ 。

3) 将 $q^{(t)}$ 记为 $I_i^{(t)}$, 从 $p^{(t)}$ 中删除 $q^{(t)}$, 剩余部分组成一个新的信号 $J^{(t)}$, 重复上述步骤, 直至每次构成的新信号函数 $J^{(t)}$ 变为单调函数^[18], 停止重复过程。由此将 $p^{(t)}$ 分解为两部分, 即 $I_i^{(t)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 和最后一个 $J_n^{(t)}$ 。

步骤 2: 针对每一层 IFM 分量 $I_i^{(t)}$, 计算每一层对应的滤波阈值, 即:

$$L_i = \beta_i \sqrt{2 \ln T} \tag{1}$$

其中:

$$\beta_i = \frac{\Delta m_i}{0.6745} \tag{2}$$

式中, β_i 为第 i 层 IFM 分量的噪声标准差; T 为含水率电信号长度; Δm_i 为第 i 层 IFM 分量的绝对中值偏差。

步骤 3: 构建小波阈值函数, 实现 IFM 分量滤波, 即:

$$I_i^{(t)} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(I_i^{(t)}) | I_i^{(t)} - L_i | & | I_i^{(t)} | \geq L_i \\ 0 & | I_i^{(t)} | < L_i \end{cases} \tag{3}$$

式中, $I_i^{(t)}$ 为滤波后的 IFM 分量; $\operatorname{sgn}(I_i^{(t)})$ 为符号函数, 表达式为:

$$\operatorname{sgn}(I_i^{(t)}) = \begin{cases} 1, & I_i^{(t)} > 0 \\ 0, & I_i^{(t)} = 0 \\ -1, & I_i^{(t)} < 0 \end{cases} \tag{4}$$

步骤 4: 对 $I_i^{(t)}$ 进行叠加, 完成输入数据的滤波处理, 得到重构滤波后的含水率电信号。

1.3.1.2 MFA-SM 输入数据的异常消除与填补

除了噪声对控制质量造成干扰外, 含水率数据中存在的异常数据也会造成一定影响。异常数据属于一种区别于正常数据分布特征的数据, 是错误数据, 其对 MFA-SM 控制造成的干扰强度大于噪声数据。为此, 必须对异常数据进行消除。基于谱聚类算法设计异常数据消除流程:

步骤 1: 输入含水率数据, 并用无向图表示, 记为 $G(V, E)$ 。其中 V 为数据集合, E 为连接数据点的边集合。

步骤 2: 计算两个数据点之间的距离作为边的权

重, 记为 w_{ij} 。

步骤 3: 根据 w_{ij} 构造权重矩阵 $W = \{w_{ij}\}_{m \times m}$ 。

步骤 4: 根据 W 构造度矩阵, 即:

$$A = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n w_{1i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n w_{2i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n w_{ni} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

步骤 5: 构造并计算拉普拉斯矩阵 B :

$$B = E - A^{-1/2} W A^{-1/2} \tag{6}$$

步骤 6: 利用图分割准则计算 B 的前 k 个最大特征值及其对应的特征向量。

步骤 7: 由 k 个特征向量构成矩阵 Q 。

步骤 8: 对 Q 进行归一化处理, 将 Q 的每一行看作一个样本点, 利用 K-means 聚类为 k 类。

步骤 9: 计算聚类中每个数据的离群指数, 并将其按照降序排序, 排名前 M 个数据点就是离群数据。

步骤 10: 集中删除找出的离群数据。

步骤 11: 缺失数据填补。删除含水率数据中的异常数据后, 原有位置会缺少数据。为此, 需要进行缺失数据填补。对所有数据进行标准化处理, 将数据映射到一个统一区间内 $0 \sim 1$, 利用随机森林算法进行缺失数据求取: 准备训练样本, 该训练样本由已知输入的含水率数据和对应的缺失数据组成。输入缺失的含水率数据到随机森林的决策树中进行训练, 经过计算后得出一个缺失值, 将该缺失值与实际缺失值进行对比, 计算二者之间的差值, 当差值小于设定的阈值时, 随机森林训练完成, 否则调整随机森林的参数, 直至差值小于设定的阈值^[19]。训练完成后, 将实际缺失的含水率数据输入到训练好的随机森林中, 经过计算得到缺失的数值。将该数值填补到缺失部位, 完成了缺失数据填补。经过上述预处理单元, 含水率数据质量更高, 为 MFA-SM 控制提供了良好的数据基础。

1.3.2 无线通信传输单元

无线通信传输单元是无线通信模块的主要运行程序, 负责进行信息传递与交互。该单元分为接收端程序与发射端程序两个。在进行这两个程序之前, 进行接收端发射端安全验证。验证程序如下: 发送端向接收端发送连接申请, 二者之间协商通信连接。发送端将身份认证证书传输给接收端, 接收端对发送端将身份认证证书进行信任度评估认证。当信任度评估认证不通过时, 接收端会弹出警告并断开二者之间的通信连接; 当接收端认为发送端可信时, 会对发送端发送可信回馈, 此时发送端随机产生会话密钥并将其发送给接收端, 这时二者

之间建立起信息安全传输通道。基于该安全通信通道，进行含水率数据包传输与发送。

1.3.2.1 发射端程序

将无线射频模块各个参数初始化为发送状态，对待传输的含水率数据进行打包，含水率数据包说明如表 1 所示。

表 1 含水率数据包说明

名称	字节	说明
固定包头标志	1 字节	数据包开始的标志
从机 ID 号	1 字节	表示现场从机地址编号
数据包长度	1 字节	一个完整数据包的大小
有效数据	以字节为单位	以字节为单位的含水率数据信息
CRC 校验	1 字节	用于数据包的差错控制
固定包尾标志	1 字节	数据包结束的标志

设置通道数为 3。将转换后的数据包发送到网关，网关接收成功后启动 A/D 转换模块，对数据包进行转换，继续转发数据包给 MFA-SM 控制器接收端。接收端接收成功后，表示数据包发送成功，发送端进行复位，开始下一个数据包的发送。当接收端错误接收数据包时，接收端发出重传命令，发送端的该数据再次发出，直至接收端成功接收到含水率数据包。

1.3.2.2 接收端程序

接收端位于 MFA-SM 控制器上，负责接收含水率数据。接收过程如下：对串口进行初始化，当有数据包发送过来时，对数据包进行安全验证，当验证通过时，将其存入缓冲区，在缓冲区对数据包进行解析。将解析后的含水率数据存入数据库当中，用于后续的研究。由此完成无线通信传输单元设计。

1.3.3 MFA-SM 控制实现单元

MFA-SM 控制实现单元是整个系统的核心单元，主要负责计算控制参数，以控制相关设备执行命令，实现含水率调节。本系统当中的控制单元以 MFA-SM 控制器为核心进行设计。MFA-SM 控制器由两个控制模型组合而成，一是无模型自适应控制模块（MFA），二是滑模控制模块（SM）。单一的控制模块存在一定的局限性，前者容易出现过拟合的问题，后者容易出现滞后现象。为弥补彼此存在的缺陷，将二者有效地结合在一起，能够极大提高含水率控制的精准度。MFA-SM 控制器结构如图 3 所示。

该控制器主要分为内外环两部分，内环为滑模控制模块（SM），外环为无模型自适应控制模块（MFA），前者用于控制干燥设备，降低烟丝含水率，后者用于控制微雾加湿器，提高烟丝含水率。内环设计依据主要基于滑模控制理论，该理论是一种鲁棒性强的控制方法，对外部干扰和系统参数摄动具有很好的抑制能力。在含

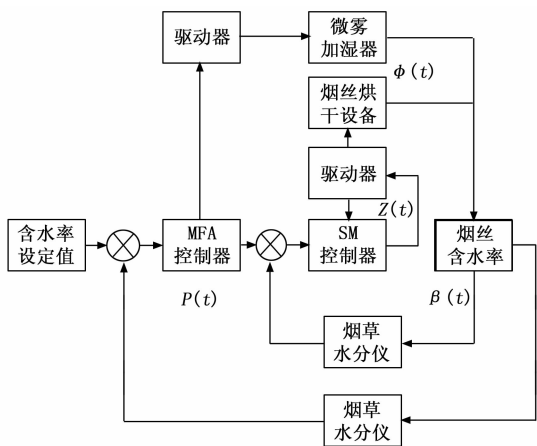


图 3 MFA-SM 控制器结构

水率控制系统中，滑模控制可以确保系统状态在预设的滑模面上滑动，从而实现系统的快速响应和稳定控制；设计原理是，首先根据系统需求和性能指标，设计合适的滑模面，使系统状态在滑模面上滑动时，能够达到期望的控制效果。然后基于滑模控制理论，设计控制律，确保系统状态能够在有限时间内到达滑模面，并在滑模面上滑动。最后通过调整控制律中的参数，如控制增益等，优化系统的动态性能和稳态性能。外环设计依据主要基于无模型自适应控制理论，该理论不依赖于被控对象的精确数学模型，而是通过在线估计系统的伪偏导数来实现对系统的控制，使无模型自适应控制方法能够适应复杂、非线性、时变等难以建立精确数学模型的系统；其设计原理是，通过在线测量系统的输入输出数据，利用无模型自适应控制方法估计系统的伪偏导数，即系统输出对输入的敏感度。基于估计的伪偏导数，设计控制律，实现对系统输出的精确控制。通过调整控制律中的参数，如步长因子、权重系数等，可以优化系统的控制效果和稳定性。接下来进行具体分析。

1.3.3.1 外环加湿控制——MFA

无模型自适应控制是基于反馈控制原理的调节器，以 t 时刻与 $t-1$ 时刻的微雾加湿器喷水量参数之间的差值作为输入，采用一种新式控制规律，弥补了非线性、大滞后和强耦合等缺陷，提升控制能力。无模型自适应控制模块（MFA）控制过程为：

计算水分仪含水率测量值与预期值之间差值：

$$\Delta e(t) = P(t) - P(t-1) \quad (7)$$

式中， $\Delta e(t)$ 为 t 时刻与 $t-1$ 时刻的微雾加湿器喷水量参数之间差值； $P(t)$ 为 t 时刻的喷水量控制值； $P(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的喷水量控制值。

根据 $\Delta e(t)$ 计算受控系统（微雾加湿器）的输入指令：

$$\varphi(t) = F(t+1) + F(t) + \Delta e(t) \quad (8)$$

式中， $F(t)$ 、 $F(t+1)$ 为微雾加湿器在 t 时刻、 $t+1$ 时刻

的实际输出。

由此得出 t 时刻的伪偏导数估算值:

$$\varphi(t) = \varphi(t) + \frac{R\Delta e(t-1)}{S + \Delta e^2(t-1)} \cdot [\Delta F(t) - \varphi(t-1)\Delta e(t-1)] \tag{9}$$

其中:

$$\Delta F(t) = F(t+1) - F(t) \tag{10}$$

式中, R 为步长因子, S 为关于参数估计变化量的权重系数。

构建微雾加湿器的控制律, 计算含水率控制参数 $\beta(t)$:

$$\beta(t) = \beta(t-1) + \frac{R\varphi'(t)}{|\varphi(t)|^2} \cdot [\dot{\lambda}(t) - \lambda(t)] \tag{11}$$

式中, $\dot{\lambda}(t)$ 为设置的预期含水率, $\lambda(t)$ 为 t 时刻的含水率测量值。

1.3.3.2 内环干燥控制——SM

上述 MFA 是应对烟丝含水率低于预期水平, 过于干燥的情况进行控制。当含水率高于预期水平时, 需要对烟丝进行干燥处理, 此时需要滑模控制模块 (SM) 发挥作用, 在其控制下, 发出热风, SM 的控制参数为热风温度与风力。其计算公式为:

$$Z(t) = \frac{a}{(1-\epsilon) \cdot r} \tag{12}$$

式中, a 为烟丝烘干设备的运行参数与电动机转速之间的关系, ϵ 为最佳滑移率, r 为烟丝烘干设备运行功率。

定义滑模面函数 $\xi(t)$, 即:

$$\xi(t) = Z(t)h \tag{13}$$

式中, h 为自适应的学习率。

由此得出滑模控制律:

$$H(t) = G\xi(t) + \frac{[\dot{\lambda}(t) - \lambda(t)]r}{y(1-\epsilon)} \tag{14}$$

式中, $H(t)$ 为 t 时刻烟丝烘干设备的控制参数, G 为李雅普诺夫函数, y 为控制增益。

在软件设计中主要包含 3 个单元, 分别为 MFA-SM 控制数据预处理单元、无线通信传输单元和 MFA-SM 控制实现单元。数据预处理单元包括滤波处理和异常数据消除与填补, 采用小波变换算法进行滤波, 基于谱聚类算法进行异常数据消除。无线通信传输单元设计安全验证程序, 设置发射端程序和接收端程序, 定制含水率数据的打包, 传输至 MFA-SM 控制器接收端。控制实现单元由 MFA 和 SM 两个模块组成, MFA 用于湿度控制, SM 用于干燥控制。

通过外环加湿控制 (MFA) 和内环干燥控制 (SM) 完成总体的系统控制, 基于 MFA 计算水分仪含水率测量值与预期值的差值, 根据反馈建立控制过程, 计算含水率控制参数, 实现微雾加湿器的控制; 基于滑模控制算法, 计算热风温度与风力的控制参数, 确保烟

丝含水率不高于预期水平。

经过上述内环滑模控制模块 (SM) 和外环无模型自适应控制模块 (MFA) 的联合控制, 实现了细支卷烟烟丝含水率的自动控制系统设计。

2 测试与分析

在完成上述系统的理论设计之后, 还需要对系统的应用效果进行仿真测试, 以保证所设计的系统能够在实际中应用。此外, 为进一步证明系统的有效性, 与文献 [4-6] 进行对比, 通过对比同样评价指标的大小, 验证系统的控制精度。

2.1 系统测试环境

测试环境的搭建是系统测试的第一步, 后续步骤均在该测试环境中进行。计算机显示器选择 AOC AG273QZ, 分辨率为 $2\,560 \times 1\,440$ 像素, 在 Matlab 2022 中进行数据仿真, 将本研究设计的自动控制系统与计算机进行连接并搭建测试环境。

2.2 烟丝预期含水率设置

所设计的基于 MFA-SM 的细支卷烟烟丝含水率自动控制系统的核心任务是让烟丝含水率能够无限靠近甚至完全达到预期水平, 因此设置烟丝预期含水率是测试中重要环节之一。随着时间的推移, 烟丝在整个烘丝过程中所要达到的预期含水率如图 4 所示。

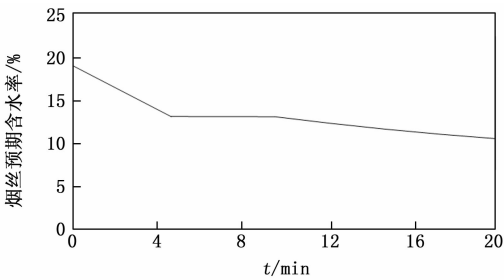


图 4 烟丝预期含水率

2.3 MFA-SM 控制结果

为实现 MFA-SM 控制系统应用效果的全面验证, 设置两种工况: 一种含水率低于预期水平; 另一种是含水率高于预期水平。针对这两种工况, 设计 MFA-SM 控制器的数学模型, 包括步长因子、参数估计变化量的权重系数、滑移率、控制增益等参数, 利用 MFA-SM 控制器进行含水率控制。MFA-SM 控制器应用的初始参数设置情况如下:

- 1) 步长因子 R : 0.30;
- 2) 关于参数估计变化量的权重系数 S : 0.036;
- 3) 最佳滑移率: 0.5;
- 4) 烟丝烘干设备运行功率: 1 500 W;
- 5) 自适应的学习率: 1.3;
- 6) 控制增益: 2.0;

在 MFA-SM 系统控制下, 针对含水率过低和过高

两种工况，微雾加湿器与烟丝烘干设备的工作参数变化如图 5 和图 6 所示。

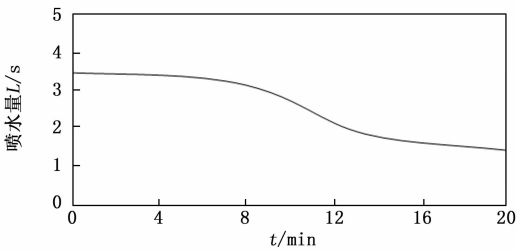


图 5 含水率过低工况下微雾加湿器喷水量变化情况

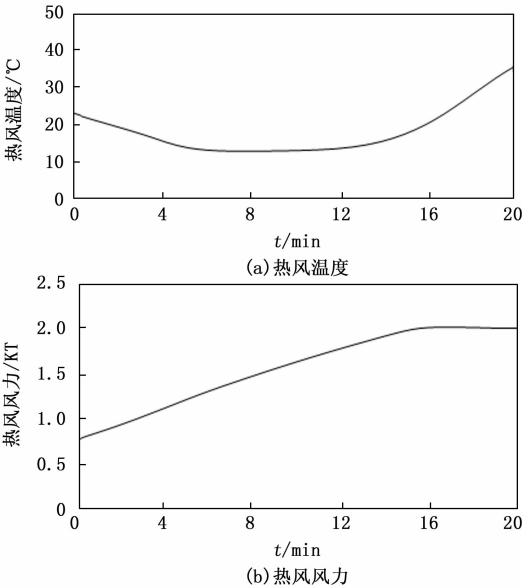


图 6 含水率过高工况下烟丝烘干设备参数变化情况

基于图 5 和图 6 参数，对两种工况下烟丝含水率进行控制。经过控制后的烟丝含水率变化情况如图 7 所示。

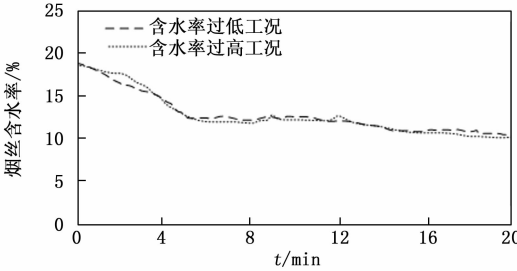


图 7 MFA-SM 自动控制后烟丝含水率变化

从图 7 中可以看出，经 MFA-SM 自动控制后。两种工况下的含水率与预期含水率几乎相同，说明设计系统能够有效实现控制。

2.4 控制效果分析

以文献 [4-6] 系统为对比，以含水率误差和拟合优度作为评价指标。在相同同样测试条件下，利用文献 [4-6] 系统进行烟丝含水率控制，计算控制后含水率与图 5 预期含水率之间的误差以及拟合优度，含水率误

差和拟合优度对比如表 2 所示。

表 2 含水率误差和拟合优度对比

时间 /min	设计系统		文献[4]系统		文献[5]系统		文献[6]系统	
	含水率 误差/%	拟合 优度	含水率 误差/%	拟合 优度	含水率 误差/%	拟合 优度	含水率 误差/%	拟合 优度
2	0.23	0.952	0.85	0.82	1.21	0.752	1.63	0.705
4	0.12	0.952	0.84	1	1.63	0.752	1.02	0.705
6	0.25	0.952	0.86	1	1.20	0.752	0.48	0.705
8	0.27	0.952	0.74	1	1.24	0.752	1.95	0.705
10	0.20	0.952	0.72	1	0.95	0.752	2.32	0.705
12	0.16	0.952	0.70	1	1.10	0.752	2.04	0.705
14	0.14	0.952	0.86	1	1.36	0.752	2.62	0.705
16	0.18	0.952	0.85	1	0.87	0.752	1.87	0.705
18	0.20	0.952	0.79	1	0.96	0.752	1.66	0.705
20	0.23	0.952	0.72	1	1.23	0.752	1.74	0.705

从表 2 中可以看出，与文献 [4-6] 系统相比，设计系统应用下，含水率误差相对更小，且低于 0.3%，拟合优度相对更高，为 0.952，说明该系统的控制效果更好，烟丝的含水率更接近预期水平。

3 结束语

研究一种基于 MFA-SM 的细支卷烟烟丝含水率自动控制系统。该系统以 MFA-SM 控制器为核心，外部连接多个关联设备。设计一个双环控制器 MFA 进行外环加水控制，SM 进行内环干燥控制，根据水分仪采集到实际含水率数据，实现了烟草水分的自动化调节。对设计系统进行测试，控制后烟丝含水率与预期含水率之间的差值和拟合优度证明了该系统的控制效果。然而，本研究受到研究条件的限制，仍存在一定的缺陷，如未对系统的运行效率进行验证，MFA 和 SM 两种控制器的存在可能会延长控制时间。为此，在下一阶段就提高控制效率进行深入的研究。

参考文献：

[1] 陈 然，林利明，陈振业，等. HDT 气流烘丝机工艺气载体载水量自动控制系统的设计与应用 [J]. 烟草科技，2022，55（9）：89-94.

[2] 王 乐，毕思强，邓国栋，等. 基于干燥动力学的烟草含水率快速检测方法 [J]. 烟草科技，2022，55（10）：88-95.

[3] 罗 鑫，张春涛. 关于时滞复杂网络的精密温度自动控制研究 [J]. 计算机仿真，2022，39（1）：243-247.

[4] 张 炜，王道铨，林苗俏，等. 非空调环境下制丝车间微雾加湿控制系统的设计 [J]. 烟草科技，2022，55（1）：107-112.

[5] 廖仲生，王昭焜，邵书音，等. 基于补偿加水的烘丝入口含水率调控系统的设计 [J]. 烟草科技，2021，54（6）：101-106.

（下转第 129 页）