

# 基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统设计

王海龙, 王新辉, 张志勇, 朱岩, 栾松年  
(山东中烟工业有限责任公司 青岛卷烟厂, 山东 青岛 266101)

**摘要:** 在烟丝加工过程中, 水分分布受到温度、湿度多个因素的影响, 控制系统无法准确反映整体水分情况; 为全面提高加工型香烟的质量水平, 设计基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统; 部署 Profibus 控制总线, 并在线路体系中连接水分检测仪与水分恒定器, 完成烟丝水分恒定控制系统的硬件设计; 在系统软件设计方面, 构建 LSTM 神经网络单元, 根据烟叶吸湿能力分析条件, 求解具体的水分分布模型, 实现基于 LSTM 神经网络的烟丝水分模型建模; 分别计算烟叶出口湿度与出口温度, 并联合传递函数逼近参量与恒定时滞参数, 完成对控制参数的整定处理, 再联合相关应用部件, 实现基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统设计; 实验结果表明, LSTM 神经网络模型作用下, 生丝含水量被稳定控制在 13%~18% 数值之间, 不会因水分过量问题而导致香烟质量水平无法达到实际加工标准。

**关键词:** LSTM 神经网络; 烟丝水分; 恒定控制; Profibus 总线; 吸湿能力; 水分模型; 出口湿度; 出口温度

## Design of Tobacco Moisture Constant Control System Based on an LSTM Neural Network

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

**Abstract:** During the tobacco processing, its moisture distribution is affected by multiple factors such as temperature and humidity, the control system can not accurately reflect the overall moisture situation. In order to comprehensively improve the quality level of processed cigarettes, a tobacco moisture constant control system based on a long short-term memory (LSTM) neural network is designed. this paper deploys Profibus control bus, connects the moisture detection instrument and moisture constant device in the circuit system, and completes the hardware design of the tobacco moisture constant control system. In terms of the system software design, the LSTM neural network unit is constructed. Based on the moisture absorption ability of tobacco leaves, the specific moisture distribution model is solved, and the tobacco moisture model based on the LSTM neural network is achieved. The outlet humidity and outlet temperature of tobacco leaves are calculated respectively, and the transfer function approximation parameters and constant time delay parameters are jointly calculated to calibrate the control parameters. Then, combined with the related application components, the tobacco moisture constant control system based on the LSTM neural network is realized. Experimental results show that under the action of the LSTM neural network model, the moisture content of raw tobacco is stabilized between 13% to 18%, which will not cause the quality level of cigarettes not meeting actual processing standards due to excessive moisture.

**Keywords:** LSTM neural network; tobacco moisture; constant control; Profibus bus; hygroscopic ability; water model; outlet humidity; outlet temperature

## 0 引言

在传统的烟草加工过程中, 对烟丝水分的控制是至关重要的环节之一。烟丝的水分不仅影响其口感和品质稳定性, 还直接影响着烟草的加工效率和产量。烟草含水量的多少受到如下两类因素的影响。内部因素: 烟叶组织结构与化学成分影响生丝的吸湿性及水分平衡能力, 是决定烟丝吸水能力的基础条件; 外部因素: 在温度保持恒定的情况下, 相对湿度水平越高, 烟丝的平衡含水率就越高; 而

在相对湿度保持恒定的情况下, 温度水平越高, 烟丝的平衡含水率也就越高; 对比二者, 湿度对烟丝水分的影响是主要的、温度的影响是次要的。由于香烟的制作对烟丝含水量有着严格要求, 所以含水量检测也是香烟加工的必要工序<sup>[1]</sup>。在烟叶生丝质量相同的情况下, 做好水分控制工作才能使香烟散发出烟草特有的香味。

对于烟丝水分的控制, 文献 [2] 提出了基于环境湿度的烟草中水分的恒定控制系统, 求解烟草生丝所能承担的最高湿度水平, 又根据蒸汽粒子的取值范围, 确定当前湿

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-11-30。

作者简介: 王海龙(1978-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 王海龙, 王新辉, 张志勇, 等. 基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 177-183, 189.

度是否达到烟丝的最高水分含量。该方法在控制烟丝含水量时,未考虑烟叶吸湿能力,导致恒定的水分含量的计算误差较大。文献 [3] 提出了一种基于补偿加水的水分调节体系,即利用疏松回潮构件对处理过程中的水分进行控制,在加热段根据补偿水分的原则,满足烟叶生丝的湿度需求,又通过多元回归分析的方式,确定烘丝物料含水率与水分变化关系之间的回归方程,以用于对加水目标的设定进行约束。该方法在控制烟丝含水量时,并没有考虑到恒定的水分含量对香烟质量的影响,故而所生产出香烟并不能完全符合实际需求标准。文献 [4] 提出一种基于长短期记忆网络 (LSTM, long short-term memory) 的齿轮箱故障诊断方法,采用滑动窗口法对故障信号进行傅里叶变换处理,选择含有较多故障特征的频率段,以此为输入,训练 LSTM 神经网络,在选定频段中实现故障特征的智能提取。该方法能够对行星齿轮传动系统的各种局部故障进行有效的诊断。这是因为 LSTM 神经网络是具有树状阶层结构的人工神经网络结构,在网络运行过程中,各级节点组织按照信息输入顺序对数据对象进行递归处理,且每一个父代节点都只能与一个子节点保持连接关系。相较于其他类型的网络结构,LSTM 神经网络内拓扑结构的连接具有可变化的特性,在权重等级相同的情况下,一个节点输出的数据信息可以在网络环境中共享,而其他节点对象则可以自由获取已输出的数据对象。此外,在网络体系保持独立连接状态的情况下,只要确保数据信息的单位累积量不超过父代节点的额定承载能力,LSTM 神经网络中就不会出现数据过量传输的问题。

综上所述,LSTM 通过引入记忆单元的设计,可以按照信息输入顺序进行记录,并将其用于后续预测之中,从而解决了长期依赖问题。且只要序列长度不超过父代节点的额定承载能力如何,LSTM 神经网络都可以实现数据训练。为此,针对传统方法不能恒定控制烟丝水分含量的问题,利用 LSTM 神经网络的应用优势,设计一种新型的烟丝水分恒定控制系统,并通过对比实验的方式,突出该系统的实际应用价值。

## 1 烟丝水分恒定控制系统硬件设计

烟丝水分恒定控制系统的核心硬件包括 Profibus 控制总线部署、水分检测仪相关控制参数的设定、水分恒定器连接 3 个基础环节,本章节针对其具体设计方法展开研究。

### 1.1 Profibus 控制总线部署

在烟丝水分恒定控制系统中,Profibus 控制总线的部署具有重要意义。Profibus 作为一种开放、国际化、不依赖于设备生产商的总线标准,广泛应用于不同场合,包括 PROFIBUS-FMS (提供强有力的通信功能)、PROFIBUS-DP (用于传感器和执行器级的高速数据传输) 和 PROFIBUS-PA (用于安全性较高的场合,允许对设备进行完全的内部操作)。在烟草制丝生产线中,采用 Profibus 现场总线技术控制的制丝生产线,按照分散控制、集中管理、数据共享的原则,达到了生产线控制和管理的管控一体化效果。这

种一体化效果使制丝生产的质量水平和设备监控能力得到了提高。

Profibus 控制总线是一种数字化串行线路体系,由物理层、数据链路层、协议层、用户接口层四部分组成,在烟丝水分恒定控制系统中,可以根据烟叶生丝表面的湿度与温度水平,增大或减少水分喷入量,从而使得烟丝水分长期保持恒定状态。物理层包含一个温湿度传感器、一个控制程序执行机构和一个水分驱动装置,其中温湿度传感器负责监测烟叶生丝表面的湿度与温度水平,并可以将实时监测结果以数值的形式传输至执行结构之中;控制程序执行机构根据烟丝温湿度监测结果,制定具体的执行程序<sup>[5]</sup>。数据链路层负责调节烟叶生丝的布置形式,并可以对物理层结构采集到的温湿度监测数值进行整合处理。协议层负载了 CAN、LonWorks、HART 三种不同的协议文本,在 Profibus 控制总线运行过程中,所有协议完全接入控制系统,并可以根据烟叶生丝表面的水分喷入量,协调物理层与用户接口层部件的连接状态。用户接口层显示了含水量、温湿度等多种不同的监测数值,且在馈电仪表设备的作用下,所有显示数值都可以用来描述烟丝的实时水分含量<sup>[6]</sup>。具体的 Profibus 控制总线部署模型如图 1 所示。

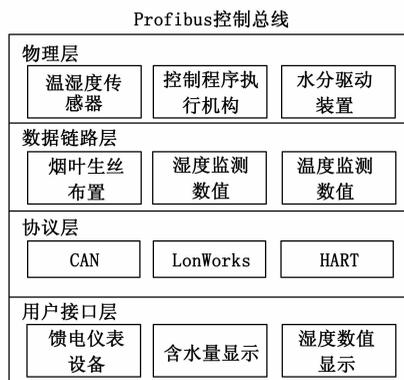


图 1 Profibus 控制总线部署模型

为实现对烟丝水分含量的恒定控制,在部署 Profibus 控制总线时,主机元件要求物理层、数据链路层、协议层、用户接口层部件之间必须保持稳定的数据信息传输关系。

### 1.2 水分检测仪相关控制参数的设定

水分检测仪用于测量烟丝加工过程中的前馈水分含量与反馈水分含量。在 Profibus 控制总线布局环境中,湿度变化对烟丝水分含量的影响较大,但环境光线、电源、频率等条件却并不会对烟草生丝的实时含水程度造成影响,因此在温度保持恒定的情况下,水分检测仪元件始终以湿度条件作为核心监测目标。检测仪的中心部件由探头元件和操作控制箱组成,前者可以直接测得烟草生丝的水分含量,并可以配合外接 PLC 结构,完成对烟叶含水率的恒定控制;操作控制箱直接与 PLC 部件相接,负责实时显示烟丝水分含量,并可以根据 Profibus 控制总线中的控制指令

输出情况, 定义具体的水分恒定控制条件<sup>[7]</sup>。对于水分检测仪相关控制参数的设定参考表 1。

表 1 水分检测仪基本参数

类别	项目	参数
水分测量需求	测量距离	200±50 mm
	测量范围	1~100%
	测量精度	±0.5 之间
控制信号输出	数字量输出	RS485、RS232
	模拟量输出	2 路直流电源
控制总线	通信控制	Profibus 控制总线、LSTM 神经网络
功耗行为	仪器仪表	≤250 W
	总控电源	≤100W

LSTM 神经网络是烟丝水分恒定控制系统的软件布置环境, 在 Profibus 控制总线物理层结构运行的过程中, 水分检测仪始终准确记录水分恒定器等其他部件结构中的电量消耗情况, 由于水分检测仪部件所负荷的电压水平不会超过 2 路直流电源的模拟输出总量, 所以对于控制系统主机元件而言, 检测仪所输出烟丝水分控制条件的准确性还无法达到实际需求标准, 为满足恒定控制需求, 还需利用水分恒定器, 对当前执行指令进行深入分析<sup>[8]</sup>。

### 1.3 水分恒定器连接

水分恒定器是烟丝水分恒定控制系统的核心应用部件, 由水量指示器、观测孔、中子探测器、中子源、闭塞器等多个结构共同组成。水量指示器是具有自主移动能力的弹性元件, 其最上端示数为零, 在烟丝含水量较低的情况下, 移动端口向下运动, 中子探测器中贮存的水分经由中子源注入到烟丝之中, 当前弹性元件所在示数位置, 就是恒定控制过程中所注入水分的具体数量水平, 经过一段时间的自由渗透之后, 被注入的水分子与烟草生丝融合, 从而达到提升烟丝含水量的目的<sup>[9]</sup>。观测孔是具有透光能力的小型孔洞, 在恒定控制烟丝水分含量的过程中, 相关操作人员可以借助该孔洞, 判断中子探测器中贮存水分的注入量数值。水分探头包括中子探测器和中子源, 前者负责贮存水分资源; 后者具有一定的水分感知能力, 当烟丝水分含量较低的情况下, 源节点打开, 探测器中贮存的水资源自由流出, 从而使得烟草生丝的含水程度大幅提升<sup>[10]</sup>。完整的水分恒定器连接结构如图 2 所示。

绳卡与水量指示器相连接, 在水分恒定器协调烟丝水分含量的过程中, 绳端收紧指示器向上移动, 当前情况下, 水分探头远离烟草生丝; 绳端放松指示器向下移动, 水分探头靠近烟草生丝, 中子探测器中的贮存水分与烟丝混合。

## 2 烟丝水分恒定控制系统软件设计

### 2.1 基于 LSTM 神经网络的烟丝水分模型建模

为实现对烟草生丝水分含量的恒定控制, 系统主机对于烟丝水分模型的定义还需参考 LSTM 神经网络, 并在此基础上, 分析烟叶的实际吸湿能力, 求解水分分布模型。

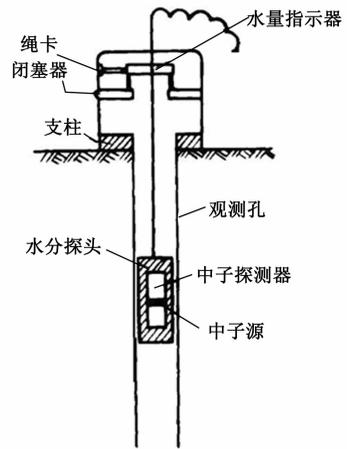


图 2 水分恒定器连接结构示意图

### 2.1.1 LSTM 神经网络构建

LSTM 神经网络 LSTM 神经网络的结构包括输入门、遗忘门、单元状态和输出门 4 个部分。

- 1) 输入门: 由一个 Sigmoid 层、一个 Tanh 层和一个忘记门层组成。
- 2) 遗忘门: 通过将输入数据和上一个时间步长的隐藏状态进行结合, 产生一个决定哪些信息需要被遗忘的“遗忘门”。
- 3) 单元状态: 在 LSTM 中, 单元状态被设计为只通过一个线性操作进行更新。
- 4) 输出门: 通过应用 Sigmoid 函数和 Tanh 函数到单元状态, 可以得到 LSTM 的输出。

综上, 可得 LSTM 神经网络的结构如图 3 所示。

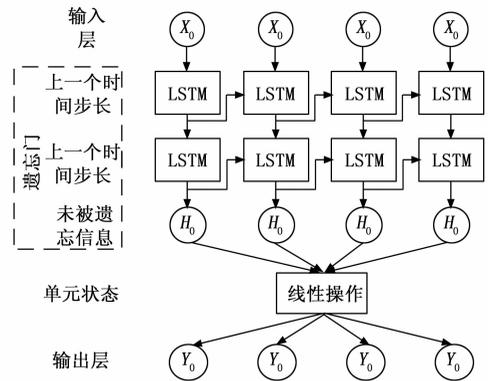


图 3 LSTM 神经网络结构示意图

将 LSTM 神经网络引入烟丝水分恒定控制系统软件的基础模型结构, 包括端口单元、Cnocat 终端、核心数据终端、执行条件输出单元 4 个组成部分。

- 1) 端口单元, 即 LSTM 端口, 在烟丝水分恒定控制系统中, 该类型单元节点与水分检测仪中的数据测量值保持对应连接关系, 且为保证 LSTM 神经网络对于烟丝水分数据的准确记录能力, 一个端口单元只能识别一种类型的数据测量值结果<sup>[11]</sup>。

2) Cnocat 是一个终端模拟器, 它旨在提供一个与真实终端一样的使用体验。Cnocat 的界面模仿了 Unix 终端的外观, 并提供了类似于终端的功能, 包括命令行工具、文本编辑器等。它可以在 Linux 和 Windows 操作系统上运行。除了基本的终端功能外, Cnocat 还支持一些高级功能, 如 SSH 连接、远程桌面连接等。这些功能使得用户可以在一个窗口中轻松地管理多个远程服务器或桌面。Cnocat 终端具有较强的数据交互处理能力, 能够负责接收经过 LSTM 端口单元处理后的烟丝水分含量测量数据, 相较于上一级网络结构, 终端单元对于数据对象的容错处理能力更强, 不同类型的数据测量值可在该结构中完全汇总, 以便于主机元件可对系统运行所需的数据样本进行直接提取与利用。

3) 核心数据终端负责存储 Cnocat 终端输出的烟丝水分含量信息, 在不考虑数据对象非完全传输行为的情况下, 终端单元所输出的测量值对象越多, 核心数据终端内烟丝水分含量信息的实时存储量就越大<sup>[12]</sup>。

4) 执行条件输出单元不具有识别烟丝水分含量信息的能力, 仅能够根据上级 LSTM 神经网络中的数据处理结果, 定义控制指令, 并可以借助信道组织, 将指令文件反馈至系统主机之中, 以便于主机设备可对烟丝水分含量进行恒定控制。

图 4 反映了 LSTM 神经网络模型的完整连接结构。

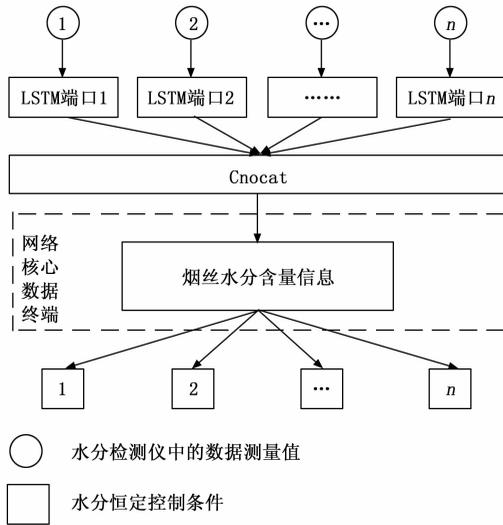


图 4 LSTM 神经网络模型的结构示意图

设  $\zeta$  表示 LSTM 端口单元对烟丝水分数据测量值的识别参数,  $l_0$  表示水分含量信息的标准标记系数,  $\psi$  表示 LSTM 端口单元中的烟丝水分含量信息记录项,  $\bar{L}$  表示 LSTM 端口在单位时间内所能识别的水分含量信息均值, 联立上述物理量, 可将 LSTM 神经网络表达式定义为:

$$H = \zeta[l_0 \cdot (\psi + 1) + \bar{L}^2] \quad (1)$$

为避免出现无法及时识别烟丝水分含量信息的问题, LSTM 神经网络端口单元中不会出现数据样本重复传输或是错序传输的情况。

### 2.1.2 烟叶吸湿能力分析

利用 LSTM 神经网络表达式, 将可吸附水体资源在烟丝表面的分布密度、烟叶生丝的初始质量、单位吸湿时长、充分吸湿后的烟叶生丝质量带入表达式, 来训练 LSTM 模型, 求解烟叶生丝的吸湿能力表达式。

烟丝中的水分含量变化是一个较为复杂的过程, 若单纯依靠数据进行判断, 则会因无法准确定义细微数值误差而导致系统主机无法对含水程度进行准确判断。吸湿能力是可以用来描述烟丝水分含量的重要参数条件, 由于吸湿是烟叶生丝所具备的物理属性, 所以在定义吸湿能力时, 即便水分含量测量值保持未知状态, 也可以根据吸水时间、总注水量等参数指标的取值, 准确计算烟叶生丝的当前含水情况<sup>[13]</sup>。

所谓吸湿就是指烟丝对流淌水、水蒸气等可提升含水程度的水分资源的吸附能力, 通常情况下, 吸湿能力越强就表示烟叶生丝在单位时间内所能吸收的水分资源越多, 系统主机在控制该类型烟丝含水量时, 为保证控制效果的恒定性, 应严格要求水资源的实时注入量<sup>[14]</sup>。

规定  $\rho$  表示可吸附水体资源在烟丝表面的分布密度, 由于注入水中可能包含烟丝碎屑等其他杂质, 所以公式 (2) 所示不等式条件恒成立 (温度为 4 °C 时, 纯净水的密度为 1 g/cm<sup>3</sup>)。

$$\rho > 1 \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

联立公式 (1)、公式 (2), 推导烟叶生丝的吸湿能力表达式为:

$$K = \frac{H(J_1 - t_0 J_0)}{\rho - 1} \quad (3)$$

其中:  $J_0$  表示烟叶生丝的初始质量,  $t_0$  表示单位吸湿时长,  $J_1$  表示充分吸湿后的烟叶生丝质量。烟丝吸湿过程中, 水分恒定器时刻保持稳定的连接状态, 因此利用 LSTM 神经网络定义吸湿能力表达式时, 不需考虑由元件开合变化行为造成的注水损失量。

### 2.1.3 水分分布模型求解

根据烟丝吸湿特性的定义, 烟丝吸湿速度与空气中水蒸气分压和烟丝中水蒸气分压之间存在压差。这个压差的大小直接决定了烟丝达到恒定状态时的含水率。因此, 在使用 LSTM 神经网络模型进行烟丝水分分布建模时, 需要考虑吸湿速度与蒸气压差的关系, 联立吸湿速度、蒸气压差以及其他相关物理量, 从而描述了烟丝的水分分布情况。

水分检测仪受到水蒸气湿度、水蒸气温度、环境温湿度、烘干温度、风力、风速、加工时长等多种因素的影响。其主要的因素是水蒸气温度与加工时间, 相对于主要因素其余因素的影响可被视为控制系统的误差向量, 而依照 LSTM 神经网络模型设计烟丝水分恒定控制系统时, 这些物理量的取值虽然不可控, 但却是始终保持不变的<sup>[15-16]</sup>。

根据烟丝吸湿特性的定义可知, 水蒸气分压  $h_0$  与空气蒸汽分压  $h_1$  有着较大差异, 这一差异的大小直接影响着恒定状态下的烟丝含水率。这就意味着利用 LSTM 神经网络

模型完成水分分布建模时, 吸湿速度  $j'$  也与蒸气压差紧密联系在一起。在上述物理量的支持下, 联立公式 (3), 可将基于 LSTM 神经网络的烟丝水分分布模型表达式定义为:

$$G = (h_0 - h_1) + j'K \times [\tilde{g}v(\tau^2 - 1) \cdot |\Delta D|] \quad (4)$$

$v$  表示水分检测仪工作状态下的水蒸气相对湿度,  $\tilde{g}$  表示烟草生丝的实时湿度特征,  $\tau$  表示基于 LSTM 神经网络所选择的烟丝含水量定义向量,  $\Delta D$  表示相对加湿过程中的水蒸气单位累积量。如果水分分布情况可控, 就表示烟叶生丝表面水蒸气的相对湿度水平可控, 设计基于 LSTM 神经网络烟丝水分控制系统, 为保证控制效果的恒定性, 就必须使相对湿度的稳定性保持为常态。

## 2.2 烟丝水分的恒定控制

综上所述, 通过分析烟叶吸湿能力, 求解水分分布模型, 可以合理确定目标水分范围、调节参数, 并进行水分分布预测, 以控制烟叶出口的湿度与温度水平。烟丝水分恒定控制要求烟叶出口的湿度与温度水平都应保持在可控状态内, 且在完成控制参数整定处理时, 还要时刻关注烟叶生丝的卷曲程度。

### 2.2.1 烟叶出口湿度控制

LSTM 神经网络可以根据上一次的烟叶出口湿度输出值和当前烟叶出口湿度, 计算出记忆单元的状态, 即:

$$Z_t^* = \tanh(\omega_c \cdot s_{t-1} + p_c) \quad (5)$$

式中,  $\omega_c$  表示遗忘门在 LSTM 神经网络中的权重,  $s_{t-1}$  表示神经元在  $t-1$  时刻的输出,  $p_c$  表示遗忘门的偏置参数。

通过遗忘门的控制, 新的记忆单元状态  $Z_t$  可以保存很久之前的烟叶出口湿度, 避免次要特征进入记忆单元, 记忆单元状态和输出门共同控制 LSTM 神经网络的烟叶出口湿度输出值, 即:

$$o_t = \sigma[\omega_o \cdot (s_{t-1}, T_t) + p_o] \quad (6)$$

其中:  $p_o$  表示输出门的偏置参数,  $\omega_o$  表示输出门的权重。

综上所述, 根据 LSTM 神经网络的结构, 利用控制门调整烟叶出口湿度的权重, 将记忆单元状态和输出门结合, 实现烟叶出口湿度的自动预测。

由于烟叶生产过程的特殊性, 使其湿度控制系统是不连续的。为此, 需将卷烟的出烟过程分为起始、稳定和收尾 3 个阶段。

#### 1) 起始阶段的湿度控制:

从烟叶进料到水分计从烟叶出口探测到信号, 这段时间约 5 分钟, 其中湿度控制回路总是处于开环联接状态, 因为水分计没有反馈信号的功能<sup>[17]</sup>。

#### 2) 稳定阶段的湿度控制:

如果水分仪能够探测到湿度, 并满足一定的要求, 那么, 整个控制系统就会一直以出水的湿度为控制对象, 并且仅在加湿蒸气的压力值维持一个恒定的条件下, 系统主机才能够实现对烟丝水分的恒定性控制<sup>[18]</sup>。

#### 3) 收尾阶段的湿度控制:

收尾阶段, 烟叶数量减少, 为继续维持烟丝水分的恒

定状态, 应缩短湿度蒸汽在水分仪中的停留时间。

对于烟叶出口湿度的控制参考如下表达式:

$$S = G \cdot \bar{w} \cdot o_t + \log(1 - f^{(\theta)})c \quad (7)$$

$\bar{w}$  表示湿度值检测特征,  $f$  表示基于 LSTM 神经网络得出的烟叶出口湿度的自动预测值,  $\theta$  表示湿度值控制参数。出口湿度只是一项相对概念, 设计烟丝水分恒定控制系统时, 若烟草进料湿度相对较高, 那么出口处的湿度水平也必然随之升高。

### 2.2.2 烟叶出口温度控制

相较于湿度条件, 温度对烟丝水分含量的影响较小。从烟草进料到检测出水分信号的过程中, 水分仪元件多次与外部水蒸气进行能量交换, 且每一次交换行为都必然导致烟叶生丝表面的温度数值发生变化。简单来说, 就是烟叶出口温度变化是一种附属性行为, 控制系统运行过程中, 烟丝表面温度不会主动发生变化, 这就表示水蒸气交换行为是在恒温状态下进行的, 但完成交换后, 必然有一部分水蒸气进入烟丝之中或是融入外部环境中, 所以必然会在交换反应后引起出口温度的改变<sup>[19-20]</sup>。LSTM 神经网络模型作为烟丝水分恒定控制系统的软件执行基础, 其对于烟叶出口温度的统计, 就是对水蒸气交换行为后烟丝表面水分温度的计算。

设  $\vartheta$  表示水蒸气交换过程中的水分恒温参数,  $\bar{M}$  表示基于 LSTM 神经网络模型的温度定义向量,  $\bar{b}$  表示烟丝加工工程中的水分温度变化特征,  $m$  表示水分仪元件与外部水蒸气之间的能量交换系数, 联立公式 (4) 及公式 (6), 推导烟叶出口温度控制表达式如下:

$$A = G \cdot o_t \sqrt{\frac{2}{\vartheta}} \cdot \log \left[ S \left( \frac{m\bar{b}}{\bar{M}} \right) \right] \quad (8)$$

温度值的变化具有明显的滞后性特征, 设计烟丝水分恒定控制系统要求出口温度保持稳定值状态, 就是避免在水蒸气能量交换之后, 烟叶生丝继续吸收外部环境中湿度较高的水分子, 从而影响香烟加工质量。

### 2.2.3 恒定控制参数整定

#### 1) 烟丝水分子的传递函数逼近:

烟丝水分子传递函数是依照 LSTM 神经网络模型求解所得的函数表达式, 对于烟丝水分恒定控制系统而言, 传递函数是主机元件协调烟叶出口湿度、出口温度所遵循的核心物理条件。在湿度控制标准、温度控制标准保持恒定的情况下, 传递函数计算结果属于一个极为广泛的数值区间, 然而过多的取值参数并不符合恒定控制烟丝水分的实际应用需求, 因此对于求解所得的传递函数还需继续进行数值逼近处理<sup>[21-22]</sup>。

#### (1) 烟丝水分子传递函数定义:

$$F = A(B^{-1}) \cdot S \left( \frac{\hat{C}}{\hat{X}} \right)^2 \quad (9)$$

$B$  表示恒定的烟丝温湿度控制系数,  $\hat{C}$  表示基于 LSTM 神经网络模型的烟叶出口温度标记向量,  $\hat{X}$  表示基于 LSTM 神经网络模型的烟叶出口湿度标记向量。

(2) 传递函数的逼近处理:

$$F' = |Z_v - Z_o|^2 \times \min\left(\frac{1}{F}\right) \quad (10)$$

$\nu, o$  表示两个随机选取的逼近值参数, 且  $\nu \neq o \neq 0$  的不等式取值条件恒成立,  $Z_v$  表示基于参数  $\nu$  的函数值定义向量,  $Z_o$  表示基于参数  $o$  的函数值定义向量。基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统要求逼近处理后的传递函数必须准确描述出烟叶出口湿度与出口温度之间的数值关系, 所以在定义逼近值参数时, 还应关注定义项指标处的烟丝实时含水量是否保持为恒定值状态。

2) 恒定时滞参数计算:

在 LSTM 神经网络中, 时滞参数可以理解为系统主机对烟丝水分含量的时效性控制能力, 出于稳定性控制的考虑, 时滞参数求解结果必须保持恒定的数值状态。恒定时滞参数是在传递函数逼近条件基础上, 对烟丝含水程度的进一步计算, 在不考虑中断控制行为的情况下, 恒定时滞参数的取值越大, 就表示烟叶生丝的当前含水程度越低, 为使其水分含量达到恒定效果, 应持续加大水蒸气注入量; 反之, 若恒定时滞参数的取值较小, 则表示烟叶生丝当前含水率较高, 出于恒定性控制水分含量的考虑, 不应继续向中子探测器中注入水蒸气, 且可以对出口处的烟丝进行适当程度的烘干处理<sup>[23-24]</sup>。

规定  $\eta$  表示出口处烟叶生丝的实时含水率, 其取值属于  $[0, 1]$  的数值区间,  $\bar{q}$  表示烟丝表面水蒸气的时间性滞留特征,  $\mu$  表示烟丝含水量实时判定系数,  $\hat{E}$  表示水蒸气含量的恒定控制向量,  $y$  表示水分含量的时间定义项,  $\nu$  表示实时控制系数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (10), 推导恒定时滞参数计算式为:

$$W = \frac{F'}{\eta(\mu q - \hat{E})^2 y^\nu} \quad (11)$$

基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统在控制水蒸气含量时, 同时考虑传递函数逼近条件与恒定时滞参数, 特别是在含水率不能保持完全固定状态的情况下, 完成对水分检测仪等硬件结构控制参数的整定处理, 才是保障系统稳定运行能力的前提。

综上所述, 基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统软件实现流程图如图 5 所示。

根据图 5 可知, 基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统的控制算法的流程如下。

1) 构建 LSTM 神经网络单元: 首先需要构建一个 LSTM 神经网络单元, 该单元包括输入门、遗忘门、单元状态和输出门 4 个部分。这些部分的参数需要通过训练数据进行学习。

2) 烟叶吸湿能力分析: 在构建 LSTM 神经网络单元后, 需要对烟叶的吸湿能力进行分析。这需要考虑到烟叶的湿度、温度等条件。

3) 求解水分分布模型: 通过分析烟叶的吸湿能力, 可以求解烟丝的水分分布模型。这需要使用 LSTM 神经网络

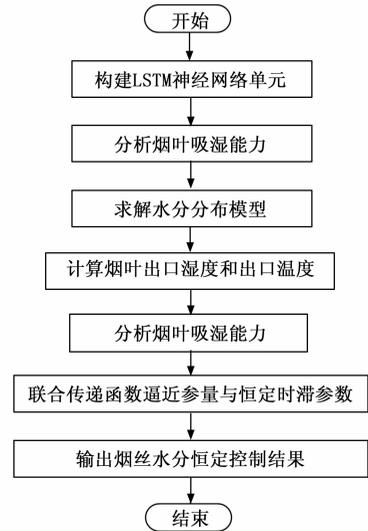


图 5 软件实现流程图

的预测能力, 将历史数据作为输入, 预测未来的水分分布。

4) 计算烟叶出口湿度与出口温度: 根据求解到的水分分布模型, 可以计算烟叶的出口湿度和出口温度。

5) 联合传递函数逼近参量与恒定时滞参数: 通过联合传递函数逼近参量和恒定时滞参数, 可以完成对控制参数的整定处理。这需要使用 LSTM 神经网络的反向传播算法, 根据误差信号进行参数调整。

最后, 需要将 LSTM 神经网络与相关的应用部件进行联合, 例如传感器、执行器等, 以实现基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统软件设计。

### 3 实例分析

为验证基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统、基于环境湿度的烟草中水分的恒定控制系统、基于补偿加水的水分调节体系在稳定控制烟草生丝水分含量方面的应用能力, 设计如下对比实验。

#### 3.1 实验方案设计

烟草生丝水分含量是影响香烟质量的重要物理量, 在加工烟叶的过程中, 精准控制烟草含水率, 使其数值稳定保持在既定数值区间之内, 才能确保生产出的香烟符合实际需求标准。

本次实验在空气相对湿度 65%~75%、温度 20±5℃ 的环境下进行, 该环境条件下, 不同烟丝含水率所对应的香烟质量等级如表 2 所示。

表 2 烟丝含水率与香烟质量等级对应关系

项目	烟丝含水率/(%)	香烟质量等级
1	<10	不符合售卖标准
2	10~13	次级香烟
3	13~18	标准售卖香烟
4	18~25	次级香烟
5	>25	不符合售卖标准

售卖不符合售卖标准的香烟或次级香烟, 属于违法行为, 因此只有标准售卖香烟才符合烟丝加工加工需求, 即只有含水率保持在 13%~18% 之间的香烟才是符合实际质量标准的烟丝加工产物。

出于公平性考虑, 实验开始前对所有烟叶生丝进行统一烘干处理。选择润叶机作为实验设备, 分别应用基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统、基于环境湿度的烟草中水分的恒定控制系统、基于补偿加水的水分调节体系对加工过程中的烟叶生丝含水率进行控制, 并将所得实验结果分别记录为实验组、对照 (1) 组、对照 (2) 组水分含量数值。

填入润叶机的实验用烟叶生丝保持完全干燥的状态, 因此在实验过程中, 应利用高温水管喷入雾状水蒸气以达到提升烟丝含水率的目的。为避免其他干扰因素对实验结果造成影响, 实验过程中高温水管始终保持接入状态, 若在某一控制系统作用下, 烟叶生丝含水率达到了预设标准数值, 润叶机则会自动控制水管, 使其不再对烟丝喷射高温水蒸气, 且本次实验不设置烘干装置。

### 3.2 数据处理

图 6 反映了实验组、对照 (1) 组、对照 (2) 组控制系统作用下, 烟丝水分含量在实验过程中的数值变化情况。

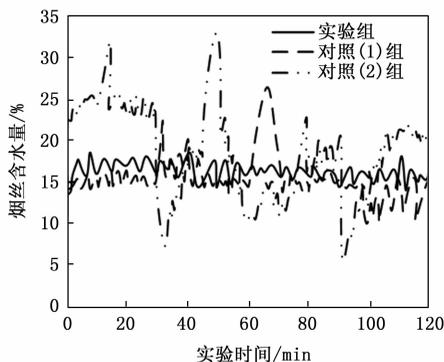


图 6 烟丝含水率

图 6 中的含水率记录数值并不从 0 开始, 因为本次实验的 0 时刻是在一段时间的高温水蒸气喷射后, 烟丝含水率基本趋于稳定时人为选定的实验开始时刻。

实验组: 第 0~第 20 min 之间时, 实验组烟丝含水率取得最大值 17.9%; 图 6 中的 0 时刻, 实验组烟丝含水率取得最小值 13.2%; 整个实验过程中, 实验组烟丝含水率始终保持在 13%~18% 的数值范围之内。

对照 (1) 组: 第 60 min~第 80 min 之间时, 对照 (1) 组烟丝含水率取得最大值 26.3%; 第 100 min 时, 对照 (1) 组烟丝含水率取得最小值 10.0%; 整个实验过程中, 对照 (1) 组烟丝含水率的数值稳定性相对较弱, 仅有部分时刻的含水率可以保持在 13%~18% 的数值范围之内。

对照 (2) 组: 第 40 min~第 60 min 之间时, 对照 (2) 组烟丝含水率取得最大值 32.8%; 第 80 min~第 100 min 之间时, 对照 (2) 组烟丝含水率取得最小值 6.0%; 整个

实验过程中, 对照 (2) 组烟丝含水率的数值稳定性也相对较弱, 也仅有一部分时刻的含水率实验结果可以保持在 13%~18% 的数值范围之内。

### 3.3 实验结论

综上可知本次实验结论为:

1) 应用基于环境湿度的烟草中水分的恒定控制系统、基于补偿加水的水分调节体系, 在烟草加工过程中, 不能保证烟丝含水率始终保持在 13%~18% 的数值范围之内, 故而在这两类系统作用下, 所加工出的香烟也就不一定完全符合标准售卖条件。

2) 应用基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统, 能够有效控制烟丝含水率, 使其稳定保持在 13%~18% 的数值范围之内, 在提高香烟加工质量方面具有突出作用价值。

## 4 结束语

设计基于 LSTM 神经网络的烟丝水分恒定控制系统, 对 Profibus 控制总线进行部署, 联合水分检测仪、水分恒定器, 分析烟叶吸湿能力, 从而在定义水分分布模型的同时, 实现对烟丝水分的恒定性控制。实验结果表明, 所设计控制系统的应用可使烟丝含水率稳定保持在 13%~18% 的数值范围之内, 不会因含水量不足或过多而影响香烟质量, 因此在该方法作用下, 确实可以保证所加工出香烟完全符合实际售卖标准, 与提高香烟质量水平的实际应用需求相符合。

### 参考文献:

- [1] 靳毅, 李安琪, 李培培, 等. 复烤后烟叶分切方式对烘后烟丝品质的影响 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (8): 212-216.
- [2] 王鹏飞, 郑晓耘, 刘冬梅, 等. 基于环境湿度影响分析的烟丝水分恒定控制方法和系统 [J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24 (2): 585-586.
- [3] 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.
- [4] 樊家伟, 郭瑜, 伍星, 等. 基于 LSTM 神经网络和故障特征增强的行星齿轮箱故障诊断 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (20): 271-277.
- [5] 刘士全, 唐海洋, 顾林. 一种改进型高速 1553B 总线发送器斜率控制电路 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (9): 63-66.
- [6] 陈宇鹏, 高伟强, 刘建群, 等. 基于 EtherCAT 总线的拖动示教机器人控制系统开发 [J]. 电气传动, 2021, 51 (21): 59-65.
- [7] 吴静珠, 张乐, 李江波, 等. 基于高光谱与集成学习的单粒玉米种子水分检测模型 [J]. 农业机械学报, 2022, 53 (5): 302-308.
- [8] 徐志豪, 张海峰, 潘冬. 基于多源信息融合的烧结混合料水分智能在线检测方法 [J]. 烧结球团, 2022, 47 (4): 18-24.
- [9] 张晓东, 段朝晖, 毛罕平, 等. 利用太赫兹光谱技术构建番茄水分胁迫状态检测模型 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (15): 121-128.

(下转第 189 页)