

卷烟烘丝机的自动化干燥处理控制研究

王家寿, 李忠态, 杨传真, 李 淳

(云南中烟工业有限责任公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对卷烟烘丝机在实际生产应用中, 如何在实时运行环境中设置最佳的控制参数存在较大的难度, 导致烟丝的干燥难以达到最佳的干燥效果。为此提出卷烟烘丝机的自动化干燥处理控制方法。结合卷烟烘丝机内空气湍流状态解析在干燥处理过程中的水分扩散特性, 基于该特性分析烘丝机内部的干、湿空气参数并计算出烟丝干燥的水分迁移量, 在此基础上, 引入 BP 神经网络, 通过其迭代学习的过程自动化输出干燥处理的控制参数。经过实验可知, 该方法控制下的干燥处理结果表现出的水分较低, 干燥效果较优, 满足了烟丝干燥处理需求。

关键词: 卷烟烘丝机; 干燥处理; 干燥控制; 烟丝干燥; 自动化控制; 控制方法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0030-05

Research on automatic drying treatment control of cigarette drying machine

WANG Jiashou, LI Zhongtai, YANG Chuanzhen, LI Chun

(Yunnan China Tobacco Industry Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: Because it is difficult to set the best control parameters in the real-time operation environment in the actual production application of cigarette dryer, it is difficult to achieve the best drying effect of cut tobacco. Therefore, the automatic drying control method of cigarette dryer is put forward. Combined with the turbulent air state in the cigarette dryer, the moisture diffusion characteristics in the drying process are analyzed. Based on this characteristic, the dry and wet air parameters in the cigarette dryer are analyzed and the moisture migration amount of tobacco drying is calculated. On this basis, BP neural network is introduced to automatically output the control parameters of drying process through its iterative learning process. The experiment shows that the drying results controlled by this method show lower moisture content and better drying effect, which meets the requirements of tobacco drying.

Keywords: cigarette dryer; drying treatment; drying control; tobacco drying; automation control; control methods

0 引言

在烟草加工生产线中, 为了避免烟丝中的水分过高对烟草的品质和口感的影响, 利用卷烟烘丝机对烟丝进行干燥处理是一项至关重要的生产步骤。在这一生产环节中, 如果烘干不充分, 将影响烟丝的品质, 如果过度烘干又将使得烟丝变得脆弱, 容易在后续的加工运输环节中产生较多的碎屑^[1]。在这样的情况下, 对干燥的过程进行精准的控制十分关键。

文献[2]设计了一种基于深度学习算法的干燥过程控制方法。该方法综合考虑了进料口的回潮问题, 在进料含水量的基础上计算烟草丝的总含水量参数。通过建立深度学习算法架构, 并引入环境温度参数以及湿度参数等影响因素, 递归计算出最佳的干燥控制参数。然而, 深度学习算法需要大量的训练数据来优化输出的控制参数, 并且对数据的稳定性质量有着较高的要求, 这在一定程度上限制了其在实际生产环节中的应用。文献[3]提出了一种基于电子鼻传感器的干燥控制方法。该方法利用高精度的电子鼻传感器获取实时的气味数据, 并通过传感器的

响应情况计算当前的温度值。结合干燥需求参数, 利用热风微波耦合的方法控制其干燥过程。但是, 该方法未充分考虑环境因素的制约, 环境中气体成分的变化可能对传感器获取的气味数据造成较大的影响, 从而导致干燥控制参数的计算存在较大的误差。文献[4]设计了一种基于 Peleg 模型的干燥控制方法。该方法首先测定环境中的相对湿度参数, 并绘制相应的水分吸附等温线。然后构建 Peleg 模型, 在该模型中拟合等温线的多阶段波动。在此基础上, 基于产品水分含量的均匀性需求, 求解模型的干燥控制参数。然而, 由于不同的干燥样品具有不同的吸湿特性, Peleg 模型可能无法充分考虑这些差异, 导致干燥控制存在一定的偏差。文献[5]设计了一种考虑了最佳流化比的干燥控制方法。该方法首先测定原始物料的密度、湿度等特性参数。然后结合环境温度对水分的蒸发情况, 计算干燥过程的最佳流化比。基于该参数设定干燥设备的进气量以及排气量等参数, 实现干燥控制过程。但是, 最佳流化比的计算可能受到多种因素的影响, 在实际应用中可能并不总是适用, 增加了干燥控制的不确定性。文献[6]提出了一种基于趋势预测以及分区反馈的干燥控制方法。该方法将含水率的实际值划分为多个偏差区间, 并

* 基金项目: 云南省基金项目(JB2022ZN02)

收稿日期: 2024-04-02

分析每个区间内的变化趋势。在此基础上建立趋势预测以及分区反馈的综合控制模型,结合机器学习算法对含水率偏差的趋势进行短期预测,并在相应的分区反馈预测结果的精准度数据,以此调控干燥控制的实施策略。然而,该方法受限于分区反馈机制的灵敏度,如果反馈数据的响应不够迅速,可能导致干燥参数的调整不够及时。

鉴于上述文献所提出的干燥控制方法在实际应用中无法满足卷烟烘丝机对烟丝干燥工艺的具体需求,对烟丝干燥工艺的实际处理需求,本研究提出了一种卷烟烘丝机的自动化干燥处理控制方法。该方法具有如下优势。

1) 采用本文方法对卷烟烘丝机的干燥处理过程进行自动化控制后,卷烟烘丝机能够根据入口处的烟丝含水率情况自动化调节离心风机以及空气加热器之间的协调参数,从而控制烟丝干燥的热风温度。

2) 采用本文方法控制后的烟丝干燥效果更加干爽,烟丝之间的蓬松度更好,既不会过度干燥呈现易碎状态,也不会过度湿润影响烟丝的卷制效果和燃烧性能,干燥处理效果有着较为显著的提升。

3) 在采用本文方法对卷烟烘丝机的干燥处理过程进行自动化控制后,十组烟丝样本中有八组准确达到预设的水分比值,且精确到了0.0001,具有良好的稳定性和精度。

4) 本文方法能够更快地使卷烟烘丝机中的烟丝干燥到预期的状态,在控制卷烟烘丝机干燥处理过程方面表现更为优越,具备更高的应用有效性。

1 卷烟烘丝机的自动化干燥处理控制方法设计

1.1 解析卷烟烘丝机干燥处理水分扩散特性

在卷烟烘丝机的干燥处理过程中,烟丝会与烘丝机内的热空气发生相互作用。基于这一原理,本研究深入解析了干燥过程的基本特性。为了简化分析,假设在理想状态下,烟丝在卷烟烘丝机中的滑移-剪切力可以忽略不计。在此条件下,主要分析烟丝受到的重力以及空气阻力的受力特性。其关系式如公式(1)所示^[7-8]。

$$\vec{F} = C\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4}(v_1 - v_2) \quad (1)$$

式中, \vec{F} 表示与烘丝机内空气流动方向所一致的烟丝受力, C 表示烘丝机结构对烟丝的曳力系数, ρ 表示烟丝密度, d 表示空气流动管径半径, v_1 和 v_2 分别表示烟丝和空气的流体速度。

在式(1)的基础上,引入雷诺数对曳力系数进行定义,如式(2)所示。

$$C = \frac{R \times \rho_f}{\eta |v_1 - v_2|} \quad (2)$$

式中, R 表示雷诺数, ρ_f 表示烘丝机中热空气的流体密度, η 表示流体相粘度。

通过重新定义并计算曳力系数,确定卷烟烘丝机中烟丝的实际受力状态。鉴于热空气在烘丝机内的流动受到

外界多种因素的影响,其流向并非单一,而是呈现出湍流的流体状态,因此,建立卷烟烘丝机的热空气湍流流动方程,以更准确地描述这一过程^[9]。计算该方程中,烟丝在热空气中的体积分参数,如式(3)所示。

$$\alpha = \frac{k \times m \times \vec{F}}{V} \quad (3)$$

式中, α 表示体积分参数, m 表示烟丝质量, V 表示烟丝体积, k 表示流体颗粒。

基于该参数,建立热空气湍流流动方程,如式(4)所示。

$$D(t) = \frac{\partial(\rho\alpha k)}{\partial t} + \alpha \left(\mu + \frac{\partial v_2}{\partial \sigma t} \right) \cdot G \quad (4)$$

式中, t 表示干燥时间, $D(t)$ 表示相应时间节点下的卷烟烘丝机热空气湍流系数, μ 表示热空气作用于烟丝的总转矩, σ 表示非稳态传热参数, G 表示惯性项。

将该方程的极值作为卷烟烘丝机干燥传质的边界条件,进而计算其干燥过程中的水分扩散特性系数值。本研究结合了舍伍德数来求解该特性系数值,具体的求解过程如式(5)及式(6)所示。

$$S = R \times d_0 \quad (5)$$

$$P = Sh \frac{D(t)}{\mu_i d_0} \sqrt{\left(\frac{c_0 \cdot h}{A} \right)^\lambda} \quad (6)$$

式中, S 表示舍伍德数, d_0 表示当量直径, P 表示水分扩散特性系数, h 表示对流换热系数, μ_i 表示流体相粘度, c_0 表示定压比热容, A 表示烟丝表面积, λ 表示流体相导热系数。

通过上述步骤,解析得出卷烟烘丝机在干燥处理过程中的水分扩散特性。

1.2 计算烟丝干燥水分迁移量

结合上述对卷烟烘丝机水分扩散特性的解析,综合考虑外界环境因素,计算干燥处理过程中,烟丝在单位时间内的水分迁移量参数。

当烟丝中的水分与烘丝机中的空气发生水分扩散行为后,干燥的热空气将会变成含有一定水量的湿空气。针对这一性质,计算湿空气的水蒸气压力状态,如式(7)所示^[10]。

$$p_q = \frac{rT\rho_q}{v_q \times v_g} \quad (7)$$

式中, p 和 q 分别表示卷烟烘丝机在干燥处理过程中,机器内部的干空气与湿空气, p_q 表示湿空气的水蒸气压力, ρ_q 表示湿空气中的水蒸气密度, v_q 表示湿空气体积, v_g 表示干空气体积, r 表示气体常数, T 表示烘丝机内部空气的热力学温度。

在此基础上,结合水分扩散特性参数,计算相应湿空气下,空气中的含湿量,如式(8)所示^[11-12]。

$$\varphi_q = P \times \frac{H_q p_q}{H_0 p_0} \quad (8)$$

式中, φ_q 表示空气含湿量, H_q 表示湿空气比焓, p_0 表示干

干燥处理外环境空气的相对湿度, H_0 表示相应的比焓。

由于卷烟烘丝机内, 烟丝的干燥处理过程是一个传热传质同时进行的过程, 水分将随着能量共同转移到空气中。以计算的空气含湿量在单位时间内的变化差值, 计算烟丝干燥的水分迁移量, 如式(9)所示。

$$L(t) = \frac{M_0(\varphi_q - \varphi_t)}{c_w} \quad (9)$$

式中, $L(t)$ 表示烟丝干燥在 t 时间节点的水分迁移量, M_0 表示卷烟烘丝机内部空气的初始质量, φ_t 表示相应时间节点的空气含湿量, c_w 表示水的比热容。

以上述步骤计算所得的水分迁移量为参数进行后续的干燥处理控制。

1.3 自动化计算干燥过程控制参数

鉴于在卷烟烘丝机的实际工作中对自主作业的需求, 本研究引入 BP 神经网络, 以便对计算的控制参数进行自主学习, 从而实现干燥处理过程的自动化控制。

本研究构建的 BP 神经网络架构包含输入层、隐藏层以及输出层三层主体架构^[13]。隐藏层的神经元数量基于输入层及输出层的神经元数量来确定, 具体的确定方式如式(10)所示^[14]。

$$Z = \sqrt{i+j} + a, a \in [0, 10] \quad (10)$$

式中, Z 表示隐藏层的神经元数量, i 和 j 分别表示 BP 神经网络的输入层和输出层的神经元数量, a 表示任意值变量。BP 神经网络架构如图 1 所示。

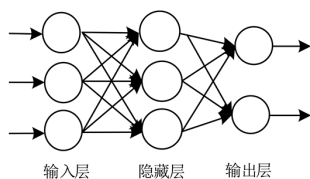


图1 BP神经网络架构拓扑结构

根据影响烟丝干燥效果的变量个数和烘丝机待控制的参数个数, 将 BP 神经网络的输入层和输出层的神经元数量均设定为 1 个。单次学习阶段中, 网络的输入项和输出项相同, 先是烟丝水分迁移量参数, 然后是基于烟丝水分迁移量参数的卷烟烘丝机热风温度控制参数。因此, 由式(10)解得隐藏层有 8 个神经元。

将计算所得的烟丝水分迁移量参数输入到确定好神经元数量的神经网络中, 并初始化处理^[15]。在隐藏层中对该参数进行自主学习。在多次迭代学习中, 为每次迭代学习设置相应的学习指标, 如式(11)所示。

$$E = \sum_{z=1}^n \gamma_z(\varepsilon)^a \quad (11)$$

式中, E 表示隐藏层学习的最小梯度指标, Z 表示隐藏层中的神经元, ε 表示局部极值, γ_z 表示最小化误差函数。

在设置的学习率等参数下, 输出 BP 神经网络对于干燥过程烟丝水分迁移量参数的学习结果。各参数的具体取值为, 学习率 0.008, 激活函数为 ReLU 函数, 批量大小

34, 迭代次数 285 次。

基于这一学习结果, 为卷烟烘丝机设置相应参数下的自动化控制参数, 具体的计算方法如式(12)所示。

$$I(L) = m_0 \log \frac{W(L \times J_E)}{(B - Y)^\beta} \quad (12)$$

式中, $I(L)$ 表示烟丝水分迁移量参数下的卷烟烘丝机热风温度控制参数, m_0 表示单次干燥的烟丝质量, W 表示烟丝水分迁移量参数等级, J_E 表示满足最小梯度指标的 BP 神经网络输出值, B 表示筒壁温度, Y 表示预热温度, β 表示卷烟烘丝机排风门开度。

将根据式(12)设置的控制参数再次输入到 BP 神经网络中进行学习, 并将其与烟丝水分迁移量参数进行关联对应。通过这种方式, 实现自动化的控制参数调节, 从而控制相应的干燥处理过程。

通过上述步骤, 完成卷烟烘丝机的自动化干燥处理控制方法的研究设计。

2 烟丝干燥控制测试

2.1 卷烟烘丝机烘丝流程

在实验室环境下, 搭建本次干燥处理控制的测试场景。选用 SH93 型号的卷烟烘丝机, 该设备采用了管束式热风循环式干燥处理流程。在该烘丝机设备的基础上, 构造本次测试的烘丝流程, 如图 2 所示。

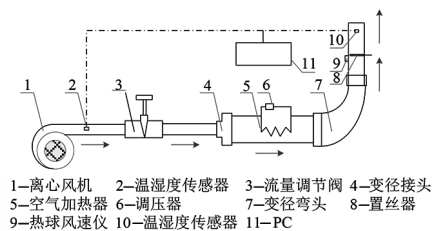


图2 卷烟烘丝机烘丝流程

如图 1 所示, 在原始卷烟烘丝机元件的基础上, 安装了精度更高的温湿度传感器以及热球风速仪, 两者的测量精度分别达到 0.1% 以及 0.01 m/s。

在本次测试过程中, 调节实验室环境的空气温度稳定在 18~22 °C 之间, 空气湿度在 40~50% 之间。在该环境下, 测试了烘丝机的各项基础运行参数。测试结果如表 1 所示。

表1 实验装置参数测试

序号	测试项目	测值均值
1	预热温度/°C	145
2	干头量/kg	15.3
3	干尾量/kg	10.1
4	烟丝进料水分/%	28.88
5	出口水分/%	15.68
6	头/尾非稳态时间/s	115/69
7	热风温度/°C	102.4
8	筒壁温度/°C	148.0

由实验装置的测试结果, 作为后续干燥处理方法的控制参数基准, 并以此分析不同方法对烟丝干燥处理的结果。

2.2 烟丝样本

本次测试过程中干燥处理的所有烟丝样本均来源于某烟草公司。该烟草样本在烘干处理前的状态如图3所示。

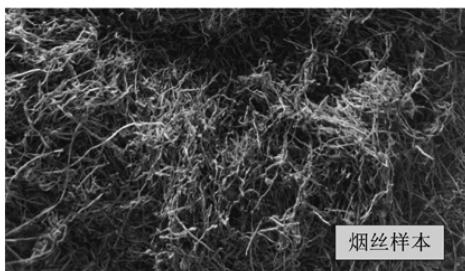


图3 干燥处理前烟丝样本

如图3所示的烟丝样本在干燥处理前的初始含水率约为30% (25℃室温环境下), 密度为120 kg/m³。

2.3 自动化干燥处理控制测试

取样两份烟丝样本, 克重均为1 000 g。将其中一份样本放置在卷烟烘丝机的置丝器上, 测试未控制之前卷烟烘丝机对烟丝样本的烘干效果。以5 s为一个时间节点, 记录卷烟烘丝机及烟丝的各项数据, 如表2所示。

表2 控制前烟丝干燥数据

时间/s	烟丝入口含水率/%	烟丝出口含水率/%	热风温度/℃
0	29.16	25.44	114.62
5	28.66	23.79	144.96
10	28.45	22.48	146.23
15	29.45	18.96	153.79
20	30.15	16.88	155.14
25	29.67	16.12	155.96
30	28.94	15.33	158.75

根据表2中的数据, 可以明显看出, 在未对干燥处理过程进行控制之前, 卷烟烘丝机对烟丝的烘干效果并不理想。运行30 s后, 烟丝的干燥情况仅能够达到15.33%, 这与烟丝生产的干燥需求存在较大的差距。

在同样的测试环境下, 将另一份烟丝样本放置在置丝器上, 并在实验装置的PC端部位实施本研究所设计的控制方法。然后, 在同样的时间节点记录自动化控制下的烟丝干燥处理数据, 结果如表3所示。

表3 控制后烟丝干燥数据

时间/s	烟丝入口含水率/%	烟丝出口含水率/%	热风温度/℃
0	30.21	18.34	165.34
5	30.98	16.52	165.92
10	28.36	13.55	156.54
15	26.78	12.45	153.78
20	29.14	12.05	160.35
25	28.94	12.01	159.78
30	30.24	11.89	165.58

根据表3中的数据, 在采用本文方法对卷烟烘丝机的干燥处理过程进行自动化控制后, 卷烟烘丝机能够根据入口处的烟丝含水率情况自动化调节离心风机以及空气加

热器之间的协调参数, 从而控制烟丝干燥的热风温度。在此控制下, 运行30 s后, 在烘丝机出口处的烟丝含水率能够达到11.89, 与烟丝加工的性能状态需求一致。

在本次测试中, 控制前后的烟丝干燥处理效果对比如图4所示。

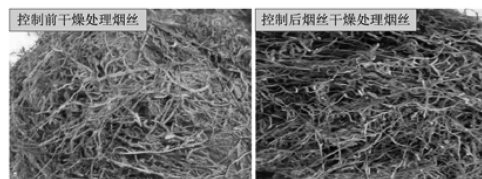


图4 控制前后烟丝干燥处理对比

从图4中的烟丝图像对比能够较为显著地看出, 控制后的烟丝干燥效果更加干爽, 烟丝之间的蓬松度更好, 既不会过度干燥呈现易碎状态, 也不会过度湿润影响烟丝的卷制效果和燃烧性能。而控制之前的烟丝湿润度较高, 呈现出过于松散的状态。由此可见, 采用本文方法控制的卷烟烘丝机干燥处理效果有着较为显著的提升。

2.4 干燥处理控制稳定性和精度分析

干燥处理控制的稳定性和精度直接关系到烟丝的生产质量、生产效率和成本控制等多个方面。将烟丝样本按重量均分成10份, 并为每份烟丝设置不同的干燥标准(即烟丝水分比)。具体如表4所示。

表4 控制后10份烟丝的干燥数据

样本号	设定值/MR	控制值/MR
1	0.475 5	0.475 5
2	0.001 4	0.001 3
3	0.918 2	0.918 2
4	0.592 7	0.592 7
5	0.516 1	0.516 1
6	0.437 5	0.437 5
7	0.627 8	0.627 8
8	0.875 4	0.875 4
9	0.523 1	0.523 1
10	0.000 8	0.000 9

根据表4中的数据, 在采用本文方法对卷烟烘丝机的干燥处理过程进行自动化控制后, 十组烟丝样本中有八组准确达到预设的水分比值, 且精确到了0.000 1。仅有两组样本在细微误差随时间的累积下, 产生了0.000 1MR的偏差。综上所述, 本文方法在卷烟烘丝机干燥处理控制方面具有良好的稳定性和精度。

2.5 干燥处理控制有效性分析

采用对比分析的方法进一步验证本文所提方法的应用有效性。分别设置文献[2]基于深度学习算法的干燥过程控制方法、文献[3]基于电子鼻传感器的干燥控制方法以及文献[4]基于Peleg模型的干燥控制方法作为对照组。采用卷烟烘丝机在干燥处理过程中, 烟丝的水分比作为评价不同控制方法应用有效性的指标。在测试过程中,

记录不同时间节点的烟丝含水率数据,并按照式(13)进行指标计算。

$$MR = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \quad (13)$$

式中, MR 表示烟丝干燥处理的水分比, M_0 表示烟丝在干燥处理之前的初始干基含水率, M_t 表示干燥控制时间节点下的实时干基含水率。

测定并采集实验数据并计算后,得到不同控制方法下,卷烟烘丝机的烟丝干燥处理有效性如图5所示。

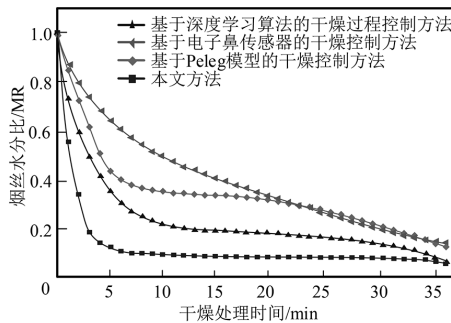


图5 卷烟烘丝机干燥处理控制对比

通过分析由实验数据计算所得水分比绘制的对比图像,可以发现同一干燥时间节点下,采用本文所提方法控制的烟丝水分比更低,这表明本文方法能够更快地使卷烟烘丝机中的烟丝干燥到预期的状态。并且在后续的干燥时间中,还能够维持这一水分比保持不变,有效避免了过度干燥对烟丝状态的不良影响。相比之下,其他控制方法不仅干燥处理效率不高,而且最终达到的烟丝干燥状态与预期值也存在一定的偏差。由此可见,本文所提方法在控制卷烟烘丝机干燥处理过程方面表现更为优越,具备更高的应用有效性。

3 结束语

本文面向卷烟烘丝机在实际生产应用环节中的烟丝干燥处理工艺,开展了自动化控制技术的研究。经过实践测试,结果表明本文方法展现出了较优的控制效果,使得干燥后的烟丝质量较高。然而,本文内容仍旧存在一定的改进空间。本文主要针对自动化的控制方式展开了研究,对于人机互动的控制方式尚未深入探讨,无法为人为的参数调节提供简便的控制方法。在后续的研究工作中,可以针对自动化与人机互动控制方式的有机结合技术进行深入的研究,以进一步提高卷烟烘丝机干燥处理控制的灵活性和可选择性。

参考文献

- [1] 聂广军, 刘文锋, 周红审, 等. 滚筒内烟丝干燥过程的数值模拟[J]. 烟草科技, 2022, 55(12):80-87.
- [2] LIN L. Research on intelligent joint control model of outlet moisture of tobacco silk drying machine[C]//2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information

(ICETCI), Changchun, China, 2023:155-159.

- [3] 刘旭, 宋春芳. 基于气味检测的西芹茎热风微波耦合干燥控制[J]. 食品与机械, 2022, 38(6):131-136.
- [4] PRAPHUNCHONAKORN K, JITTANIT W. Moisture sorption isotherms, drying behavior, and quality attributes of mango sheets dried using hot air combined with relative humidity control[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(3):1-15.
- [5] MESSENGER A. Optimizing fluidized-bed drying processes modern control technologies and industrial automation strategies can help processors use fluidized-bed dryers to drive competitiveness and profitability[J]. Chemical Engineering, 2023, 130(9):22-26.
- [6] 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.
- [7] 李善莲, 安佳敏, 刘朝贤, 等. 基于自编码器和PCA的滚筒烘丝机多块过程监测方法[J]. 轻工学报, 2023, 38(6):110-117.
- [8] 虞文进, 王文娟, 叶志晖, 等. 基于状态估计深度时序网络模型的烘丝工艺建模方法[J]. 制造业自动化, 2023, 45(11):190-194.
- [9] 庄红军, 严奉军, 毛先胤, 等. 输电线主动除冰机器人后台监控系统的设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(2):22-27.
- [10] 刘静远, 李昕, 刘杰, 等. 基于融合注意力时间卷积网络的烘丝出口含水率控制方法[J]. 烟草科技, 2023, 56(8):93-99.
- [11] 安佳敏, 张雷, 李善莲, 等. 基于AE重构误差和SVDD的滚筒叶丝干燥异常工况检测[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(6):31-37.
- [12] 张雷, 李金学, 堵劲松, 等. 基于DGRU网络的烘丝机筒壁温度动态预测[J]. 轻工学报, 2022, 37(6):85-91, 100.
- [13] 刘穗君, 刘颖, 赵万莹, 等. 薄板烘丝机出口含水率稳定性控制方法研究[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(5):41-46.
- [14] 付来强, 郭亚强, 郭志强, 等. 优化SH626型薄板烘丝机设备参数降低干头干尾[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(1):39-43.
- [15] 刘颖, 刘穗君, 李少华, 等. 烘干法水分测定仪测量物料含水率的预测及修正[J]. 包装工程, 2023, 44(增刊2):82-86.

王家寿(1969—), 男, 博士研究生, 高级经济师, 研究方向:智能制造。

通信作者:李忠志(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向:人工智能。