

烟草烘丝过程的水分控制

王艳红 韩光胜

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京, 100022)

摘要 讨论了烟草生产中烘丝过程的水分控制问题。根据烘丝过程各阶段不同的工艺要求,提出了包括有关控制、跟踪控制及预测控制的分段变策略控制方案。针对烘丝过程的非线性、不确定性及存在大滞后的特点,提出了一种基于模糊模型的自校正预测控制算法,并且与前馈控制方法结合,应用于烘丝过程的送料稳定阶段。系统仿真证明的可行性。

关键词 烘丝过程, 模糊模型, 预测控制, 前馈控制

分类号 TP273⁺.5

烘丝过程是卷烟制丝工艺中一道重要工序,通过对烟丝加热干燥,使其达到一定水分。使烟丝的水分符合工艺要求;提高烟丝的弹性和填充能力,改善烟丝质量。烘后烟丝水分是直接影响卷烟内在质量的重要参数。图1为烘丝机结构示意图。通过调节蒸汽阀门开度,控制烘丝机滚筒的温度,从而达到控制烟丝水分的目的。

由于烘丝过程具有较强的非线性、不确定性和大滞后特性,再加上烟草本身的性质特殊,因而使得烘丝过程水分控制变得十分复杂。本文提出了一种基于模糊模型的自校正预测控制算法,并结合前馈控制方法,用于烘丝过程的送料稳定阶段。仿真研究证明了方法的可行性。

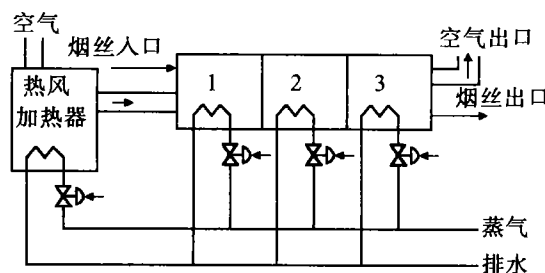


图1 烘丝机工作原理图

1 烘丝过程的分段变策略控制

烘丝机对每一叶组的加工过程分为3个阶段:送料前准备阶段、送料开始阶段和送料稳定阶段。这3个阶段由于控制要求不同,所以采用不同的控制策略。

1.1 送料前准备阶段的开关控制

送料前准备阶段是指从滚筒开始加热到送料开始阶段前的一段过程。这阶段的控制要求是:避免出现过干的烟丝。根据工厂实际经验,采用开关控制,就能满足要求。

① 将烘丝筒的3个蒸汽阀门的开度置为最大($DF_{\max} = 80\%$),直到滚筒温度 $T_c > (T_0 + DT)$ 且温度梯度 $G > G_1$ 时,将蒸汽阀门的开度置为最小($DT_{\min} = 10\%$),持续时间按下式计算

$$t = (T_r - T_c) \times T_a + T_b \quad (1)$$

其中, T_0 为开关控制开始前滚筒的温度; DT 为第1步温度控制基准, 取为 3°C ; G_1 为第1步温度梯度基准, 取为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$; T_r 为开关控制温度目标值, 取为 80°C 。 T_a 和 T_b 为时间常数, 分别取为 1 s 和 10 s 。

② 当滚筒温度 $(T_0 + DT) < T_c \leq (T_r - DLT)$ 且温度梯度 $G \leq G_2$ 时, 蒸汽阀门开度置为最大

(DF_{max}), 持续时间按式(1)计算. 考虑到滚筒温度达到期望值有一定的滞后时间, 所以还要在一段时间(取为35 s)内保持蒸汽阀门开度为最小(DF_{min}), 以防滚筒温度过高, 而使烟丝过干. DLT为温度测量不敏感区, 数值为 5°C . 第2步温度梯度基准 G_2 取为 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

③ 当滚筒温度 $T_c < T_r$ 且温度梯度 $G \leq G_3$ 时, 蒸汽阀门开度又置为最大(DF_{max}), 持续时间按式(1)计算. 第3步温度梯度基准 G_3 取为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

开关控制时序图如图2所示.

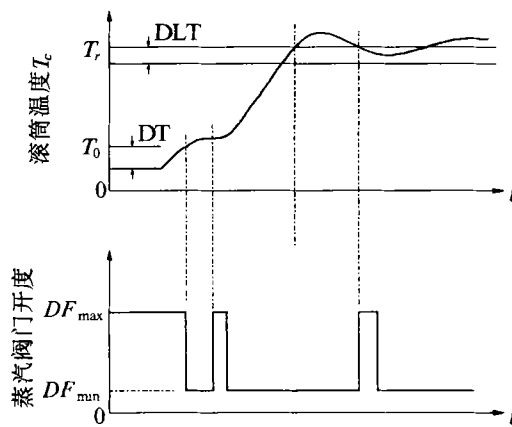


图2 开关控制顺序图

1.2 送料开始阶段的跟踪控制

当来料流量高于基准流量时, 切换到跟踪控制, 其目的是保证在送料开始阶段不出现过干烟丝. 此阶段烟丝的流量大于第1阶段, 滚筒温度不需再保持一定低温, 而应随着烟丝流量的增加而升高, 其增长速度应与来料流量的增长速度相适应, 所以称这种控制方式为跟踪控制. 又因为3个烘丝筒的流量增加有一定的时间顺序(见图3), 所以应对其分别进行控制.

跟踪控制分为3步:

1) 从来料流量大于基准流量时开始计时, 在时间 $t < t_n$ 内, 将各滚筒的温度设定值均置为0, 通过PID控制算法调节3个蒸汽阀门的开度. t_n (n 为滚筒号)为各滚筒的温度控制从第1步切换到第2步所需要的时间, 取 $t_1 = 1\text{ s}, t_2 = 90\text{ s}, t_3 = 160\text{ s}$.

2) 在时间 $t_n \leq t \leq t_{sn}$ 内, 各滚筒温度设定值均为 T_{01} ($= 85^{\circ}\text{C}$), 并利用PID控制算法调节各蒸汽阀门开度. t_{sn} (n 为滚筒号)各滚筒的温度控制从第2步切换到第3步所需时间, 取 $t_{s1} = 10\text{ s}, t_{s2} = 120\text{ s}, t_{s3} = 200\text{ s}$.

3) $t \geq t_{sn}$ 之后, 各滚筒温度设定值 T_m (n 为滚筒号)按下列公式计算, 并利用PID算法对3个蒸汽阀门进行调节, 直到滚筒1的设定值与下一阶段通过模糊模型计算出的温度设定值相等为止.

$$\begin{aligned} T_{a1} &= \alpha F_1 + \beta W_1 - \delta + \Delta T_1 \\ T_{a2} &= \alpha F_1 + \beta W_1 - \delta + \Delta T_2 \\ T_{a3} &= \alpha F_1 + \beta W_1 - \delta \end{aligned} \tag{2}$$

其中: α, β, δ 为运算常数; F_1 为来料流量; W_1 为来料水分; $\Delta T_1, \Delta T_2$ 为滚筒1, 2的温差; $\Delta T_1 = 5^{\circ}\text{C}, \Delta T_2 = -5^{\circ}\text{C}; T_{an}$ 为计算系数.

将式(2)作一次延时计算, 得到各滚筒的温度设定值

$$T_m = Yk_n = (T_{an} \times t_s + Y(k-1)n \times t_{fn}) / (t_s + t_{fn}) \tag{3}$$

其中, t_s 为采样时间, 按经验取为1 min. t_{fn} 为各加热的流量时间常数, 按式(4)计算. $Y(k-1)n$ 为各滚筒温度的前次延时计算值, 其初始值按式(5)计算.

$$t_{fn} = t_f \times R_n \tag{4}$$

其中, t_f 为烘丝机出口流量时间常数, 取180 s. R_n 为各滚筒的流量时间常数比率, 取 $R_1 = 0.3, R_2 = 0.6, R_3 = 1.0$.

$$Y(k-1)n = T_{an} - (T_{an} - T_r) \times T_n \tag{5}$$

T_n 按式(6)计算

$$T_n = t_{ct} / (t_{fn} + t_{ct}) \tag{6}$$

其中 t_{ct} 为温度时间常数, 取60 s.

跟踪控制温度设定值曲线如图4所示.

PID控制量按下列公式计算:

$$\begin{aligned} \Delta M_n &= (100 / PB) \times (\Delta E_n + T_s / T_i \times E_n + T_d / T_s \times \Delta \Delta E_n) \\ M_n &= M_{n-1} + \Delta M_n \end{aligned} \tag{7}$$

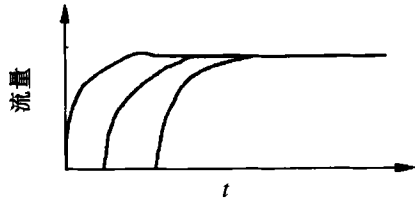


图3 各滚筒截面的烟丝流量特性

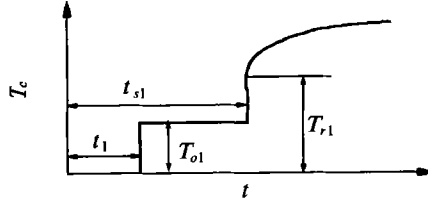


图4 滚筒1的跟踪控制温度设定值曲线

其中 PB, T_i, T_a 的数值需在实际生产中通过反复调试而确定; E_n 是温度设定值与实测值之差. M_n 为调节量, 既蒸汽阀门开度.

1.3 送料稳定阶段的前馈控制和预测控制

送料稳定阶段在整个烘干过程中持续时间最长(约 60 min), 是直接影响产品质量的关键. 此阶段的控制要求是: 保证出口烟丝水分满足工艺要求, 控制精度在 $\pm 0.3\%$ 范围内. 这一阶段的控制较为复杂, 主要表现在以下几个方面: ① 烘丝过程中每一叶组所送烟丝品牌的差异以及烟丝的形状、疏松程度等各种不确定因素使烘丝过程具有不确定性. ② 控制精度要求很高. ③ 烟丝的水分控制既复杂又很微妙, 其中包含许多人工经验, 按常规方法难以取得良好的控制效果. ④ 烘丝过程中存在着来料流量和来料水分的波动等强干扰因素.

由于在烘丝连续生产中难以获得阶跃响应、脉冲响应模型, 因此本文提出一种基于模糊模型的预测控制算法, 用于烘丝筒 3 的水分控制. 模糊模型采用 T-S 模糊模型^[1]. 它是一种非线性模型, 使所提出的预测控制算法可用于非线性对象的控制. 模糊模型可利用烘丝筒的实际控制数据获得, 而且结构简单, 便于在线辨识.

1.3.1 烘丝筒 1, 2 的前馈控制

烘丝筒 1, 2 采用前馈方法控制, 以便达到预烘丝的目的. 通过模糊模型建立前馈补偿规律, 采用模糊模型可充分学习到烟丝水分控制经验. 根据卷烟厂的实际控制数据, 采用神经网络模糊建模法^[4, 5], 建立两个反映烘丝筒 1, 2 温度设定值的模糊模型.

烘丝筒 1 的温度设定值模型:

$$R^i: \text{if } f_1 \text{ is } A_1^i, w_1 \text{ is } A_2^i, T_a \text{ is } A_3^i$$

$$\text{Then } T_{c10}(I) = P_0^i + P_1^i f_1 + P_2^i w_1 + P_3^i T_a \quad (8)$$

烘丝筒 2 的温度设定值模型:

$$R^i: \text{IF } T_{c1} \text{ is } A_1^i, t_a \text{ is } A_2^i$$

$$\text{Then } T_{c20}(i) = P_0^i + P_1^i T_{c1} + P_2^i T_a \quad (9)$$

其中, T_{c1} 为滚筒 1 的实际温度.

将 f_1, w_1, T_a, T_{c1} 的模糊子集均划分为小、中、大, 且各变量的论域均量化为 3 档 (+1, +2, +3), 其隶属函数均为取高斯型, 形式如下

$$\mu L(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i > 3 \\ \exp[-(x_i - aL_i)^2 / bL_i] & x_i < 3 \end{cases}$$

$$\mu M(x_i) = \exp[-(x_i - aM_i)^2 / bM_i]$$

$$\mu S(x_i) = \begin{cases} \exp[-(x_i - aS_i)^2 / bS_i] & x_i > 1 \\ 1 & x_i < 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, x_i 为各变量量化后的数值, aL_i, aM_i, aS_i 的初始值分别取 3, 2, 1; bL_i, bM_i, bS_i 的初始值分别取 0.6, 0.3, 0.6.

由此, 烘丝筒 1 的温度设定值模型的模糊规则数定为 27 条, 烘丝筒的温度设定值模型的模糊规则数

定为9条。根据模糊建模算法^[1],得到滚筒 1,2 的温度设定值如下:

$$T_{10} = \sum_{i=1}^{27} G^i T_{c10}(i) / \sum_{i=1}^{27} G^i \quad (11)$$

其中, $G^i = \Lambda \mu A_j^i(x_{j_0})$ ($j = 1, 2, 3$)

$$T_{20} = \sum_{i=1}^9 G^i T_{c20}(i) / \sum_{i=1}^9 G^i \quad (12)$$

其中, $G^i = \Lambda \mu A_j^i(x_{j_0})$ ($j = 1, 2$)

模糊模型中的各前提参数和结论参数可利用一种混合 Pi-Sigma神经网络根据 BP 算法进行辨识.

1.3.2 烘丝筒 3 的预测控制

1) 烘丝水分控制算法的确定

经分析,烟丝出口水分是烟丝入口温度、水分和周围空气湿度的非线性函数,而烟丝的温度又与烘丝机滚筒的温度有着非线性关系,所以可认为该对象是四输入、单数出的非线性对象.

设在 $k-d-1$ 时刻,预测模数输出 $H_{om}(k)$ (k 时刻的烟丝出口水分)为

$$H_{om}(k) = f[T_c(k-d-1), T_t(k-d-1), H_a(k-d-1), H_i(k-d-1)] \quad (13)$$

式中: T_c 为滚筒温度; T_t 为烟丝入口温度; H_a 为周围空气湿度; H_i 为烟丝入口水分; d 为滞后.

采用一预测控制算法,有

$$H_{op}(k+d+1) = H_{om}(k+d+1) + e(k) \quad (14)$$

$H_{op}(k+d+1)$ 为 $k+d+1$ 时刻的预测输出.

$$E(k) = H_o(k) - H_{om}(k) \quad (15)$$

其中: $H_o(k)$ 为 k 时刻对象的实际输出; $e(k)$ 为 k 时刻模型输出的误差.

取参考轨迹为一条直线,即

$$H_{or}(k+d+1) = H_{op}(k+d+1) = HR \quad (16)$$

其中 $H_{or}(k+d+1)$ 为对象的期望输出.

$$H_{or}(k+d+1) = H_{om}(k+d+1) + H_o(k) - H_{om}(k) = f[T_c(k), t_t(k), H_a(k), H_i(k)] + H_o(k) - H_{om}(k) \quad (17)$$

$$f[T_c(k), t_t(k), H_a(k), H_i(k)] = H_{or}(k+d+1) - H_o(k) + H_{om}(k) \quad (18)$$

式(18)中, $H_{or}(k+d+1)$ 、 $H_o(k)$ 、 $H_{om}(k)$ 均为已知, $f[]$ 中的参数也已通过离线辨识和在线修正而得到确定,所以由式(18)可求出控制量 $T_c(k)$ 的大小.

2) 烟丝出口水分控制算法

根据上述分析,可以利用现场实测数据作为训练样本,采用神经网络模糊建模法,建立模糊预测模型,预测对象的未来输出,并根据未来输出实际值,求出预测输出误差.同时引入自校正机制,利用实际输入输出数据在线修正预测模型参数.这样,自校正预测控制系统把抗干扰性和鲁棒性划分到基础预测层分别处理,因而对非线性、不确定性、时变的被控对象可以获得较好的控制综合性能^[2].

参考轨迹:由于滚筒 3 的出口为烟丝的输出口,此处所测量的烟丝水分值恰为被控量——烟丝出口水分.因此,烟丝水分的参考轨迹就定为一条直线,此条直线就为烟丝期望输出值,即

$$H_r(k+i) = H_R, \quad i = 1, \dots, p+d \quad (19)$$

性能指标:无论在生产工艺还是在生产条件上,对控制量 $T_c(k)$ 的大小都没有任何限制要求,所以取性能指标为:

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^{p+d} q_i [H_r(k+i) - H_p(k+i)]^2 \quad (20)$$

其中 $H_p(k+i)$ 为校正后的模型输出.

考虑到烘丝过程为慢时变过程,采样时间相对来说较长,因此,采用一步预测控制,完全可满足控制要求.由一步预测控制性能指标求出控制量 $T_c(k)$ 为:

$$H_R = H_{op}(k+d+1) = H_{om}(k+d+1) + H_o(k) - H_{om}(k) \quad (21)$$

预测模型的形式为:

$$H_{om}(k+d+1) = P_0 + P_1 \times t_c(k) + P_2 \times t_1(k+1) + P_3 \times H_a(k) + P_4 \times H_t(k) \quad (22)$$

其中, P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 为模糊预测模型的结论参数(计算公式见式(26)), 它们是通过离线辨识、在线修正(利用上一步实际输入输出数据 $T_c(k-d-1), T_t(k-d), H_a(k-d-1), H_t(k-d-1)$ 和 $H_o(k)$ 来进行参数修正)而最终得到的.

由式(21)、(22)可求出控制量

$$T_c(k) = [H_R = H_o(k) + H_{om}(k) - P_0 - P_2 \times T_t(k+1) - P_3 \times H_a(k) - P_4 \times H_t(k)] / P_1 \quad (23)$$

预测模型: R^i : if T_{c3} is A_1^i, t_t is A_2^i, H_a is A_3^i, H_t is $A_4^i,$

$$\text{Then } h_{om}(i) = P_0^i + P_1^i T_{c3} + P_2^i H_a + P_4^i H_t \quad (24)$$

将 T_{c3}, T_t, H_a, H_t 的模糊子集均划分为小、中、大, 且各变量的论域均量化为 3 档 $\{+1, +2, +3\}$. 其隶属函数均取高斯型, 形式如式(10).

由此得到 81 条模糊规则, 根据模糊建算法, 得到烟丝出口水分预测值:

$$H_{om}(k) = \sum_{i=1}^{81} G^i h_{om}(i) / \sum_{i=1}^{81} G^i \quad (25)$$

式(22)中的 P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 由下式算出:

$$\begin{aligned} P_0 &= \sum_{i=1}^{81} G^i P_0^i / \sum_{i=1}^{81} G^i \\ P_1 &= \sum_{i=1}^{81} G^i P_1^i / \sum_{i=1}^{81} G^i \\ P_2 &= \sum_{i=1}^{81} G^i P_2^i / \sum_{i=1}^{81} G^i \\ P_3 &= \sum_{i=1}^{81} G^i P_3^i / \sum_{i=1}^{81} G^i \\ P_4 &= \sum_{i=1}^{81} G^i P_4^i / \sum_{i=1}^{81} G^i \end{aligned} \quad (26)$$

2 仿真研究及结果分析

为了检验上述控制方法的可行性, 本文进行了仿真实验. 并且根据传热学、质扩散的基本理论和烟丝特性, 对烘丝过程进行详尽的分析, 建立了一个能基本反映对象特性的数学模型.

$$T_t(t) = T_c + (25 - T_c) \times \exp \{ \ln (T_c - 55) / (T_c - 25) \} / 12 \} \quad (27)$$

烟丝烘干水分量变化规律:

$$G = \frac{1.62 [10.13 \times T_t \times T_c - 101\,324.8 \times H_a / (662 + H_a)]}{22\,308.86 \times T_t + 1.62} \quad (28)$$

在上述基础上, 进行了仿真实验研究, 控制曲线如图 5 所示.

从图 5 中可看出, 基于模糊模型的自校正预测算法与前馈控制算法结合, 对烟丝水分的控制取得了良好的效果, 控制精度达到了工艺要求的精度 ($\pm 0.3\%$). 说明本文提出的控制方法对于烟草烘丝过程这样的非线性、不确定、大滞后对象是可行的.

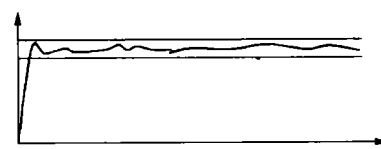


图5 烟丝出口水分控制曲线

3 结束语

本文针对烘丝过程的非线性、不确定性、大时滞等特点, 提出了一种基于模糊模型的预测控制算法, 并

结合前馈控制方法,对烘丝机3个加热筒的温度进行控制,因而实现了对烟丝水分的控制。

模糊模型是一种非线性模型,可以反映非线性系统的输入输出关系,而且,通过现场实际操作数据建立的模糊模型,还可以反映人工操作经验。因此,将模糊模型作为预测模型,使预测控制能够实施对非线性对象的控制;前馈补偿模型的建立则反映了人工操作经验,使控制更为有效。仿真研究证明了控制方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Tomchiro, Tagaki, Michio Sugeno. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control. IEEE Trans. On Sys, Man, and CYber, 1985, 15(1): 116~131
- 2 王艳红. 一种基于模糊模型的预测控制算法研究及其在烟草烘丝过程中的应用: [学位论文]. 北京: 北京工业大学自动化系, 1996
- 3 张化光, 吕剑虹, 陈来九. 模糊广义预测控制及其应用. 自动化学报, 1993, 19(1): 9~16
- 4 张化光, 柴天佑, 王殿辉, 等. 操作人员控制规则的模糊建模及其应用. 自动化学报, 1994, 20(3): 308~314
- 5 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 1993

The Humidity Control for Tobacco Drying Process

Wang Yanhong Han Guangsheng

(College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract The humidity control problem in the tobacco production is discussed in this article. According to the different requirements at the individual stages of tobacco drying process, a piecewise control strategy consisting of the on-off control, tracking control, and predictive control is suggested. In view of the nonlinearity, uncertainty and the large time-delay of the tobacco drying process, a self-tuning predictive control algorithm based on the fuzzy model is applied to the stable stage of the tobacco drying process incorporating the feedforward control method. The feasibility is shown by the pertinent simulations.

Keywords tobacco drying proc, fuzzy model, predictive control, feedforward control