



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103610227 B

(45) 授权公告日 2015. 04. 15

(21) 申请号 201310659839. 1

(22) 申请日 2013. 12. 09

(73) 专利权人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号

(72) 发明人 彭辉 顾云峰 王丹 刘明月

李立 阮文杰 魏吉敏 肖玉娇

(74) 专利代理机构 长沙正奇专利事务所有限责

任公司 43113

代理人 马强

(51) Int. Cl.

A24B 3/10(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102871214 A, 2013. 01. 16,

CN 102090703 A, 2011. 06. 15,

CN 102090704 A, 2011. 06. 15,

CN 103238916 A, 2013. 08. 14,

CN 103324089 A, 2013. 09. 25,

CN 102488308 A, 2012. 06. 13,

CN 102090705 A, 2011. 06. 15,

US 3905123 A, 1975. 09. 16,

审查员 叶玉婷

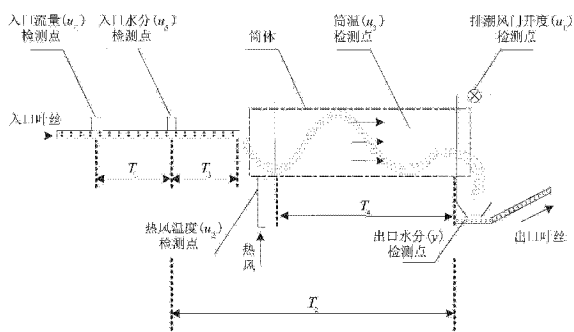
权利要求书5页 说明书12页 附图1页

(54) 发明名称

一种烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法,依据烘丝过程头尾段筒温、风温、排潮风门等工艺变量的历史数据,采用三次函数作为径向基函数的 Cubic-RBF-ARX 模型对烘丝动态特性进行建模;所建模型具有自调节能力,能反映不同模式下的入口流量以及入口水分的变化对出口水分的影响,可根据头尾段不同模式的入口流量及入口水分的变化来预测未来出口水分的变化情况;根据所建模型对各工艺变量进行优化设定,可使头尾段叶丝出口水分的控制达到较好的效果。本发明方法综合考虑了来料量与各输入变量间的动态特性,可以更有效地克服来料流量和水分变化对烘丝过程头尾段的影响,适用于不同模式下叶丝入口流量与入口水分时的头尾段控制。



1. 一种烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法,其特征在于,该方法为:

1) 根据烘丝机的运行流程,建立烘丝过程中叶丝入口流量、入口水分、筒温、风温、排潮风门、出口水分的时序关系,同时根据烘丝过程干头阶段无叶丝出口水分检测值、干尾阶段无叶丝入口流量与入口水分检测值的特点,采用三次函数作为径向基函数的 Cubic-RBF-ARX 模型,分别建立烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型;

2) 根据烘丝机头尾段的历史运行数据,采用结构化非线性参数优化方法分别优化烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型;

3) 依据优化的烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型,采用双 S 型函数描述干头阶段的排潮风门、风温、筒温的最优输入曲线;采用阶跃函数描述干头阶段的入口流量的最优输入曲线;采用指数函数描述干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线;

4) 采用列维布格奈奎尔特方法,通过使优化的干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值与出口水分设定值的误差最小,寻找出烘丝过程干头阶段与干尾阶段的最优输入曲线的参数,以适应来料情况的变化,减少干尾阶段的干料量;

所述步骤 1) 中,烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型为:

$$\begin{aligned}
 y^H(t^H) = & \varphi_0^H + \sum_{i^H=1}^{mp^H} \varphi_{i^H}^H y^H(t^H - i^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{1,j^H}^H u_1^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{2,j^H}^H u_2^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{3,j^H}^H u_3^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{4,j^H}^H u_4^H(t^H - T_1 - T_3 - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{5,j^H}^H u_5^H(t^H - T_3 - j^H \cdot T_0^H) + \xi^H(t^H)
 \end{aligned}$$

其中:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \varphi_0^H = \omega_0^{H,0} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{k^H}^{H,0} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
 \varphi_{i^H}^H = \omega_{i^H,0}^{y^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{i^H,k^H}^{y^H} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
 \psi_{n,j^H}^H = \omega_{n,j^H,0}^{u^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{n,j^H,k^H}^{u^H} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,u^H} \right\|_F^3 \\
 X^H(t^H - 1) = \begin{bmatrix} u_4^H(t^H - 1) & u_5^H(t^H - 1) \\ u_4^H(t^H - 2) & u_5^H(t^H - 2) \\ \vdots & \vdots \\ u_4^H(t^H - d^H) & u_5^H(t^H - d^H) \end{bmatrix}; \\
 Z_{k^H}^{H,y} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,y} & z_{k^H,1}^{2,H,y} \\ z_{k^H,2}^{1,H,y} & z_{k^H,2}^{2,H,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,y} & z_{k^H,d^H}^{2,H,y} \end{bmatrix}; Z_{k^H}^{H,u} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,u} & z_{k^H,1}^{2,H,u} \\ z_{k^H,2}^{1,H,u} & z_{k^H,2}^{2,H,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,u} & z_{k^H,d^H}^{2,H,u} \end{bmatrix} \\
 T_0^H = [T_4 / nq^H], T_4 = T_2 - T_3 \\
 i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H; n = 1, 2, 3, 4, 5
 \end{array} \right.$$

其中, $y^H(t^H)$ 表示烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分; $u_1^H(t^H)$, $u_2^H(t^H)$, $u_3^H(t^H)$, $u_4^H(t^H)$, $u_5^H(t^H)$ 分别表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的排潮风门开度、风温、筒温、入口流量及入口水分; $x^H(t^H-1)$ 为入口流量和入口水分的状态变量; np^H , nq^H , d^H 和 m^H 均表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次; $Z_{k^H}^{H,y}$, $Z_{k^H}^{H,u}$ 分别为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心; $\omega_0^{H,0}$, $\omega_{i^H,0}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,0}^{u^H}$, $\omega_{k^H}^{H,0}$, $\omega_{i^H,k^H}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,k^H}^{u^H}$ 为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权重系数; $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数; $\xi^H(t^H)$ 是干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的建模误差, 为高斯白噪声; T_0^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间, T_1 为从有入口流量检测值到有入口水分检测值的时间, T_2 为从有入口水分检测值到有出口水分检测值的时间, T_3 为从有入口水分检测值到烘丝筒入口的时间, T_4 为叶丝在烘丝筒烘干的时间;

所述步骤 1) 中, 烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型为:

$$\begin{aligned}
 y^T(t^T) = & \varphi_0^T + \sum_{i^T=1}^{np^T} \varphi_{i^T}^T y^T(t^T - i^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{1,j^T}^T u_1^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{2,j^T}^T u_2^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) \\
 & + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{3,j^T}^T u_3^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{4,j^T}^T u_4^T(t^T - T_1 - T_3 - j^T \cdot T_0^T) \\
 & + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{5,j^T}^T u_5^T(t^T - T_3 - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{6,j^T}^T u_6^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \xi^T(t^T)
 \end{aligned}$$

其中：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0^T = \omega_0^{T,0} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{k^T}^{T,0} \left\| X^T(t^T-1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\ \varphi_{i^T}^T = \omega_{i^T,0}^{y^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{i^T,k^T}^{y^T} \left\| X^T(t^T-1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\ \psi_{n,j^T}^T = \omega_{n,j^T,0}^{u^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{n,j^T,k^T}^{u^T} \left\| X^T(t^T-1) - Z_{k^T}^{T,u} \right\|_F^3 \\ X^T(t^T-1) = \begin{bmatrix} u_2^T(t^T-1) & u_6^T(t^T-1) \\ u_2^T(t^T-2) & u_6^T(t^T-2) \\ \vdots & \vdots \\ u_2^T(t^T-d^T) & u_6^T(t^T-d^T) \end{bmatrix} \\ Z_{k^T}^{T,y} = \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,y} & z_{k^T,1}^{2,T,y} \\ z_{k^T,2}^{1,T,y} & z_{k^T,2}^{2,T,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,y} & z_{k^T,d^T}^{2,T,y} \end{bmatrix}; \quad Z_{k^T}^{T,u} = \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,u} & z_{k^T,1}^{2,T,u} \\ z_{k^T,2}^{1,T,u} & z_{k^T,2}^{2,T,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,u} & z_{k^T,d^T}^{2,T,u} \end{bmatrix} \\ T_0^T = [T_4 / nq^T], \quad T_4 = T_2 - T_3 \\ i^T = 1, \dots, np^T; \quad j^T = 1, \dots, nq^T; \quad k^T = 1, \dots, m^T; \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \end{array} \right.$$

其中， $y^T(t^T)$ 表示烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分； $u_1^T(t^T)$, $u_2^T(t^T)$, $u_3^T(t^T)$, $u_4^T(t^T)$, $u_5^T(t^T)$, $u_6^T(t^T)$ 分别表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的筒温、热风风温、排潮风门开度、入口流量、入口水分及筒体电机频率； $X^T(t^T-1)$ 为热风风温和筒体电机频率的状态变量； np^T , nq^T , d^T 和 m^T 均表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次； $Z_{k^T}^{T,y}$, $Z_{k^T}^{T,u}$ 分别为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心； $\omega_0^{T,0}$, $\omega_{i^T,0}^{y^T}$, $\omega_{k^T}^{T,0}$, $\omega_{n,j^T,0}^{u^T}$, $\omega_{i^T,k^T}^{y^T}$, $\omega_{n,j^T,k^T}^{u^T}$ 为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权系数； $\xi^T(t^T)$ 是干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模误差，为高斯白噪声； T_0^T 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间；

所述步骤 2) 中，烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型优化如下：

$$\left(\hat{\theta}_N^H, \hat{\theta}_L^H \right) = \arg \min_{\hat{\theta}_N^H, \hat{\theta}_L^H} \sum_{t^{oh}=1}^{N^H} \left(\bar{y}^H(t^{oh}) - \hat{y}^H(t^{oh}) \right)^2$$

其中， $\hat{y}^H(t^{oh})$ 是烘丝机干头阶段出口水分的实际值， $\bar{y}^H(t^{oh})$ 是在实际输入作用下，由烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值；

$\hat{\theta}_L^H = \left\{ \omega_0^{H,0}, \omega_{i^H,0}^{y^H}, \omega_{n,j^H,0}^{u^H}, \omega_{k^H}^{H,0}, \omega_{i^H,k^H}^{y^H}, \omega_{n,j^H,k^H}^{u^H} \mid i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H \right\}$ 为烘丝机干头

阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数； $\hat{\theta}_N^H = \{Z_{k^H}^{H,y}, Z_{k^H}^{H,u} | k^H = 1, \dots, m^H\}$ 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数； N^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度；

烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型优化如下：

$$(\hat{\theta}_N^T, \hat{\theta}_L^T) = \arg \min_{\theta_N^T, \theta_L^T} \sum_{t^{ot}=1}^{N^T} (\bar{y}^T(t^{ot}) - \hat{y}^T(t^{ot}))^2$$

其中， $\hat{y}^T(t^{ot})$ 是烘丝机干尾过程中出口水分的实际值； $\bar{y}^T(t^{ot})$ 是在实际输入作用下，由烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值；

$\theta_L^T = \{\omega_0^{T,0}, \omega_{i,0}^{T,0}, \omega_{n,j,0}^{T,0}, \omega_k^{T,0}, \omega_{i^T,k^T}^{T,0}, \omega_{j^T,k^T}^{T,0} | i^T = 1, \dots, np^T; j^T = 1, \dots, nq^T; k^T = 1, \dots, m^T\}$ 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数， $\theta_N^T = \{Z_{k^T}^{j^T,y}, Z_{k^T}^{j^T,u} | k = 1, \dots, m^T\}$ 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数， N^T 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度；

所述步骤 3) 中：

用于描述烘丝机干头阶段排潮风门、风温、筒温的最优输入曲线的双 S 型函数表达式为：

$$U_{sc}(t^s) = \frac{\lambda_1}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_2}{\lambda_3}}} + \lambda_4 + \frac{\lambda_5}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_6}{\lambda_7}}}$$

其中， t^s 为输入的时间，单位为 s； $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5$ 分别为双 S 型函数的起点、转折点及终点值； λ_2, λ_6 分别为双 S 型函数的两条对称轴中心位置； λ_3, λ_7 分别为双 S 型函数上升或下降的速度； λ_3, λ_7 大于 0 时表示 S 型函数上升， λ_3, λ_7 小于 0 时表示 S 型函数下降； $c = 1, 2, 3, U_{s1}(t^s)$ 是排潮风门的设定值； $U_{s2}(t^s)$ 是风温的设定值； $U_{s3}(t^s)$ 是筒温的设定值；

用于描述烘丝机干头阶段入口流量的最优输入曲线的阶跃函数表达式为：

$$U_T(t^T) = \begin{cases} \frac{\kappa_1 t^T}{\kappa_2} & t^T \in [1, \kappa_2] \\ \kappa_1 & t^T \in [\kappa_2 + 1, \kappa_3] \end{cases} ;$$

其中， t^T 为输入的时间，单位为 s； $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 分别为阶跃函数的上升速度、上升时间与终值；

所述步骤 3) 中，用于描述干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线的指数函数的表达式为：

$$U_{zp}(t^z) = \alpha_{p1} \times (\alpha_{p2})^{t^z} + \alpha_{p3} ;$$

$p = 1, 2, 3, 4$

式中 $U_{z1}(t^z), U_{z2}(t^z), U_{z3}(t^z), U_{z4}(t^z)$ 分别表示干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线。

2. 根据权利要求 1 所述的烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法, 其特征在于, 所述步骤 4) 中, 将烘丝机干头阶段优化设定曲线 $U_{sc}(t^a)$ 、 $U_T(t^1)$ 代入所述烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的输入变量 $u_1^H(t^a)$ 、 $u_2^H(t^a)$ 、 $u_3^H(t^a)$ 、 $u_4^H(t^a)$ 中, 得到烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^H(t^a)$; 通过使干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^H(t^a)$ 与出口水分设定值 $y_{set}(t^a)$ 的误差 $e_H(t^a)$ 最小, 即采用列维布格奈奎尔特方法求解优化问题 $\min_{\lambda_x, \kappa_g} J = \sum_{t^a=1}^M e_H^2(t^a)$, 寻找出干头阶段排潮风门、风温、筒温的输入曲线的参数 λ_x 和入口流量输入曲线的参数 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$; 其中, $x = 1, 2, \dots, 7$; $g = 1, 2, 3$; M 是干头阶段持续的时间。

3. 根据权利要求 1 所述的烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法, 其特征在于, 所述步骤 4) 中, 将烘丝机干尾阶段优化设定曲线 $U_{zp}(t^z)$ 代入所述烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的输入变量 $u_1^T(t^b)$ 、 $u_2^T(t^b)$ 、 $u_3^T(t^b)$ 、 $u_6^T(t^b)$ 中, 得到烘丝机干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^T(t^b)$; 通过使干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^T(t^b)$ 与出口水分设定值 $y'_{set}(t^b)$ 的误差 $e_T(t^b)$ 最小, 即采用列维布格奈奎尔特方法求解优化问题 $\min_{\alpha_{pg}} J' = \sum_{k=1}^{M'} e_T^2(t^b)$, 寻找出干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率最优输入曲线的参数 α_{pg} ; 其中, $g = 1, 2, 3$; M' 是干尾阶段持续时间。

一种烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法。

背景技术

[0002] 烘丝过程是香烟制丝生产中最重要的一道加工工序,它主要是通过对叶丝进行加热干燥,降低叶丝的含水率,使烘烤后叶丝的含水率、温度均匀一致,并控制在一定的数值范围内,以满足生产工艺要求。烘丝的工艺流程主要分为预热、干头、中间以及干尾过程四个部分。在干头阶段,叶丝入口流量不断增加,但无叶丝出口水分的检测值,难以进行反馈控制,容易造成干头阶段出口水分控制品质差、干料多;在干尾阶段,由于叶丝入口流量骤然减少,而烘丝筒具有较大热容,筒壁内部温度难以按规定的速率下降等问题,也容易造成干尾阶段出口水分控制性能低且干料多。因此,“干头干尾”是目前烘丝过程出口水分控制的难点所在。

[0003] 现有的干头干尾过程控制方法主要有:

[0004] (1) 利用进入和输出烘丝机的物料和干燥介质作为热质平衡对象建立数学模型,结合前馈PID调节筒温的控制方式。但前馈数学模型仅考虑了进料的含水率和流量,并没有考虑热风温度等其他对出口水分有重要影响的因素,不能完全反应真实过程,造成头尾段烘丝机出口水分波动大,需要操作人员进行人工干预,对于头尾段不同模式下的、具有不同入口流量和入口水分的来料难以获得满意的控制效果。

[0005] (2) 在上述前馈控制的基础上,在头尾段增加蒸喷加湿装置对头尾料施加蒸汽水来提高头尾料的含水率,以降低干料量。但此方法仅对叶丝表层进行加湿,仅提高了叶丝表层湿度,仍然会造成烟丝内在质量的降低,且增加了出口水分控制的难度与稳定性。

[0006] (3) 通过多次试验、寻求最佳头尾阶段热风温度值和调整排潮阀门开度等工艺参数来减少干料量。此方法缺乏自调节能力,无法保证对于不同模式下具有不同入口流量和入口水分的来料时,该组工艺参数均为最优设定值;

[0007] (4) 在PID控制策略的基础上,将模糊控制的思想应用到烘丝机水分控制中。

[0008] 仅仅用单纯的二维模糊控制器来解决烘丝过程出口水分的控制问题仍然无法获得最优的工艺参数设定值,而且对于不同模式下的入口流量与入口水分的变化,还需对模糊控制规则表进行调整,这对工业生产带来不便。

发明内容

[0009] 本发明所要解决的技术问题是,针对现有技术不足,提供一种烘丝机头尾段工艺变量优化控制方法,使干头阶段叶丝出口水分尽可能快地上升、并快速到达稳定状态,使干尾阶段叶丝出口水分尽可能缓慢地下降,从而有效地减少头尾段的干料量,提高烘丝过程的控制性能;更有效地克服来料流量和水分变化对烘丝过程头尾段的影响,避免人工整定输入工艺变量参数的不便。

[0010] 为解决上述技术问题,本发明所采用的技术方案是:一种烘丝机头尾段工艺变量

优化控制方法,该方法为:

[0011] 1) 根据烘丝机的运行流程,建立烘丝过程中叶丝入口流量、入口水分、筒温、风温、排潮风门、出口水分的时序关系,同时根据烘丝过程干头阶段无叶丝出口水分检测值、干尾阶段无叶丝入口流量与入口水分检测值的特点,采用三次函数作为径向基函数的 Cubic-RBF-ARX 模型,分别建立烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型;

[0012] 2) 根据烘丝机头尾段的历史运行数据,采用结构化非线性参数优化方法分别优化烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型;

[0013] 3) 依据优化的烘丝过程干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型,采用双 S 型函数描述干头阶段的排潮风门、风温、筒温的最优输入曲线;采用阶跃函数描述干头阶段的入口流量的最优输入曲线;采用指数函数描述干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线;

[0014] 4) 采用列维布格奈奎尔特方法,通过使优化的干头阶段与干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值与出口水分设定值的误差最小,寻找出烘丝过程干头阶段与干尾阶段的最优输入曲线的参数,以适应来料情况的变化,减少干尾阶段的干料量。

[0015] 所述步骤 1) 中,烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型为:

[0016]

$$\begin{aligned}
 y^H(t^H) = & \varphi_0^H + \sum_{i^H=1}^{np^H} \varphi_{i^H}^H y^H(t^H - i^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{1,j^H}^H u_1^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{2,j^H}^H u_2^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{3,j^H}^H u_3^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{4,j^H}^H u_4^H(t^H - T_1 - T_3 - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{5,j^H}^H u_5^H(t^H - T_3 - j^H \cdot T_0^H) + \xi^H(t^H)
 \end{aligned}$$

[0017] 其中:

[0018]

$$\left\{ \begin{array}{l}
\varphi_0^H = \omega_0^{H,0} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{k^H}^{H,0} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
\varphi_{i^H}^H = \omega_{i^H,0}^{y^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{i^H,k^H}^{y^H} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
\psi_{n,j^H}^H = \omega_{n,j^H,0}^{u^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{n,j^H,k^H}^{u^H} \left\| X^H(t^H - 1) - Z_{k^H}^{H,u^H} \right\|_F^3 \\
X^H(t^H - 1) = \begin{bmatrix} u_4^H(t^H - 1) & u_5^H(t^H - 1) \\ u_4^H(t^H - 2) & u_5^H(t^H - 2) \\ \vdots & \vdots \\ u_4^H(t^H - d^H) & u_5^H(t^H - d^H) \end{bmatrix}; \\
Z_{k^H}^{H,y} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,y} & z_{k^H,1}^{2,H,y} \\ z_{k^H,2}^{1,H,y} & z_{k^H,2}^{2,H,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,y} & z_{k^H,d^H}^{2,H,y} \end{bmatrix}; Z_{k^H}^{H,u} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,u} & z_{k^H,1}^{2,H,u} \\ z_{k^H,2}^{1,H,u} & z_{k^H,2}^{2,H,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,u} & z_{k^H,d^H}^{2,H,u} \end{bmatrix} \\
T_0^H = [T_4 / nq^H], T_4 = T_2 - T_3 \\
i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H; n = 1, 2, 3, 4, 5
\end{array} \right.$$

[0019] 其中, $y^H(t^H)$ 表示烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分; $u_1^H(t^H)$, $u_2^H(t^H)$, $u_3^H(t^H)$, $u_4^H(t^H)$, $u_5^H(t^H)$ 分别表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的排潮风门开度、风温、筒温、入口流量及入口水分; $X^H(t^H-1)$ 为入口流量和入口水分的状态变量; np^H , nq^H , d^H 和 m^H 均表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次; $Z_{k^H}^{H,y}$, $Z_{k^H}^{H,u}$ 分别为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心; $\omega_0^{H,0}$, $\omega_{i^H,0}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,0}^{u^H}$, $\omega_{k^H}^{H,0}$,

$\omega_{i^H,k^H}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,k^H}^{u^H}$ 为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权系数; $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数; $\xi^H(t^H)$ 是干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的建模误差, 为高斯白噪声; T_0^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间, T_1 为从有入口流量检测值到有入口水分检测值的时间, T_2 为从有入口水分检测值到有出口水分检测值的时间, T_3 为从有入口水分检测值到烘丝筒入口的时间, T_4 为叶丝在烘丝筒烘干的时间。

[0020] 所述步骤 1) 中, 烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型为:

[0021]

$$\begin{aligned}
y^T(t^T) &= \varphi_0^T + \sum_{i^T=1}^{np^T} \varphi_{i^T}^T y^T(t^T - i^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{1,j^T}^T u_1^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{2,j^T}^T u_2^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) \\
&+ \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{3,j^T}^T u_3^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{4,j^T}^T u_4^T(t^T - T_1 - T_3 - j^T \cdot T_0^T) \\
&+ \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{5,j^T}^T u_5^T(t^T - T_3 - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{6,j^T}^T u_6^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \xi^T(t^T)
\end{aligned}$$

[0022] 其中：

[0023]

$$\left\{ \begin{array}{l}
\varphi_0^T = \omega_0^{T,0} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{k^T}^{T,0} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\
\varphi_{i^T}^T = \omega_{i^T,0}^{y^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{i^T,k^T}^{y^T} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\
\psi_{n,j^T}^T = \omega_{n,j^T,0}^{u^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{n,j^T,k^T}^{u^T} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,u} \right\|_F^3 \\
X^T(t^T - 1) = \begin{bmatrix} u_2^T(t^T - 1) & u_6^T(t^T - 1) \\ u_2^T(t^T - 2) & u_6^T(t^T - 2) \\ \vdots & \vdots \\ u_2^T(t^T - d^T) & u_6^T(t^T - d^T) \end{bmatrix} \\
Z_{k^T}^{T,y} = \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,y} & z_{k^T,1}^{2,T,y} \\ z_{k^T,2}^{1,T,y} & z_{k^T,2}^{2,T,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,y} & z_{k^T,d^T}^{2,T,y} \end{bmatrix}; \quad Z_{k^T}^{T,u} = \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,u} & z_{k^T,1}^{2,T,u} \\ z_{k^T,2}^{1,T,u} & z_{k^T,2}^{2,T,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,u} & z_{k^T,d^T}^{2,T,u} \end{bmatrix} \\
T_0^T = [T_4 / nq^T], \quad T_4 = T_2 - T_3 \\
i^T = 1, \dots, np^T; \quad j^T = 1, \dots, nq^T; \quad k^T = 1, \dots, m^T; \quad n = 1, 2, 3, 4, 5
\end{array} \right.$$

[0024] 其中， $y^T(t^T)$ 表示烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分； $u_1^T(t^T)$ ， $u_2^T(t^T)$ ， $u_3^T(t^T)$ ， $u_4^T(t^T)$ ， $u_5^T(t^T)$ ， $u_6^T(t^T)$ 分别表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的筒温、热风风温、排潮风门开度、入口流量、入口水分及筒体电机频率； $X^T(t^T-1)$ 为热风风温和筒体电机频率的状态变量； np^T ， nq^T ， d^T 和 m^T 均表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次； $Z_{k^T}^{T,y}$ ， $Z_{k^T}^{T,u}$ 分别为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心； $\omega_0^{T,0}$ ， $\omega_{i^T,0}^{y^T}$ ， $\omega_{k^T}^{T,0}$ ， $\omega_{n,j^T,0}^{u^T}$ ， $\omega_{i^T,k^T}^{y^T}$ ， $\omega_{n,j^T,k^T}^{u^T}$ 为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权系数； $\xi^T(t^T)$ 是干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模误差，为高斯白噪声； T_0^T 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间。

[0025] 所述步骤 2) 中,烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型优化如下:

$$[0026] \quad (\hat{\boldsymbol{\theta}}_N^H, \hat{\boldsymbol{\theta}}_L^H) = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_N^H, \boldsymbol{\theta}_L^H} \sum_{t^{oh}=1}^{N^H} (\bar{y}^H(t^{oh}) - \hat{y}^H(t^{oh}))^2$$

[0027] 其中, $\hat{y}^H(t^{oh})$ 是烘丝机干头阶段出口水分的实际值, $\bar{y}^H(t^{oh})$ 是在实际输入作用下,由烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值;

$\hat{\boldsymbol{\theta}}_L^H = \left\{ \omega_0^{H,0}, \omega_{i^H,0}^{y^H}, \omega_{n^H,0}^{u^H}, \omega_{k^H,0}^{H,0}, \omega_{i^H,k^H}^{y^H}, \omega_{j^H,k^H}^{u^H} \mid i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H \right\}$ 为烘丝机干头

阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数; $\hat{\boldsymbol{\theta}}_N^H = \left\{ Z_{k^H}^{H,y}, Z_{k^H}^{H,u} \mid k^H = 1, \dots, m^H \right\}$ 为烘丝机干头阶段

Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数; N^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度。

[0028] 烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型优化如下:

$$[0029] \quad (\hat{\boldsymbol{\theta}}_N^T, \hat{\boldsymbol{\theta}}_L^T) = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_N^T, \boldsymbol{\theta}_L^T} \sum_{t^{ot}=1}^{N^T} (\bar{y}^T(t^{ot}) - \hat{y}^T(t^{ot}))^2$$

[0030] 其中, $\hat{y}^T(t^{ot})$ 是烘丝机干尾过程中出口水分的实际值; $\bar{y}^T(t^{ot})$ 是在实际输入作用下,由烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值;

$\boldsymbol{\theta}_L^T = \left\{ \omega_0^{T,0}, \omega_{i^T,0}^{y^T}, \omega_{n^T,0}^{u^T}, \omega_{k^T,0}^{T,0}, \omega_{i^T,k^T}^{y^T}, \omega_{j^T,k^T}^{u^T} \mid i^T = 1, \dots, np^T; j^T = 1, \dots, nq^T; k^T = 1, \dots, m^T \right\}$ 为烘丝机干尾

阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数, $\boldsymbol{\theta}_N^T = \left\{ Z_{k^T}^{j^T,y}, Z_{k^T}^{j^T,u} \mid k^T = 1, \dots, m^T \right\}$ 为烘丝机干尾阶段

Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数; N^T 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度。

[0031] 所述步骤 3) 中:

[0032] 用于描述烘丝机干头阶段排潮风门、风温、筒温的最优输入曲线的双 S 型函数表达式为:

$$[0033] \quad U_{sc}(t^s) = \frac{\lambda_1}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_2}{\lambda_3}}} + \lambda_4 + \frac{\lambda_5}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_6}{\lambda_7}}}$$

[0034] 其中, t^s 为输入的时间,单位为 s; $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5$ 分别为双 S 型函数的起点、转折点及终点值; λ_2, λ_6 分别为双 S 型函数的两条对称轴中心位置; λ_3, λ_7 分别为双 S 型函数上升或下降的速度; λ_3, λ_7 大于 0 时表示 S 型函数上升, λ_3, λ_7 小于 0 时表示 S 型函数下降; $c=1, 2, 3, U_{s1}(t^s)$ 是排潮风门的设定值; $U_{s2}(t^s)$ 是风温的设定值; $U_{s3}(t^s)$ 是筒温的设定值。

[0035] 用于描述烘丝机干头阶段入口流量的最优输入曲线的阶跃函数表达式为:

$$[0036] \quad U_T(t^T) = \begin{cases} \frac{\kappa_1 t^T}{\kappa_2} & t^T \in [1, \kappa_2] \\ \kappa_1 & t^T \in [\kappa_2 + 1, \kappa_3] \end{cases};$$

[0037] 其中, t^T 为输入的时间,单位为 s; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 分别为阶跃函数的上升速度、上升时

间与终值。

[0038] 所述步骤 4) 中, 烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^H(t^a)$ 为: $\bar{y}^H(t^a) = f(U_{s1}(t^a), U_{s2}(t^a), U_{s3}(t^a), U_T(t^a))$, $\bar{y}^H(t^a)$ 通过将烘丝机干头阶段各工艺变量的优化设定曲线代入所构建的干头阶段 Cubic-RBF-ARX 的输入变量 $u_1^H(t^a), u_2^H(t^a), u_3^H(t^a), u_4^H(t^a)$ 中得到。通过使干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^H(t^a)$ 与出口水分设定值 $y_{set}(t^a)$ 的误差 $e_H(t^a)$ 最小, 即采用列维布格奈奎尔特方

法求解优化问题 $\min_{\lambda_x, \kappa_g} J = \sum_{t^a=1}^M e_H^2(t^a)$, 寻找出干头阶段排潮风门、风温、筒温的输入曲线的参

数 λ_x 和入口流量输入曲线的参数 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$; 其中, $x=1, 2, \dots, 7$; $g=1, 2, 3$; M 是干头阶段持续的时间。

[0039] 所述步骤 3) 中, 用于描述干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线的指数函数的表达式为:

$$[0040] \quad U_{zp}(t^z) = \alpha_{p1} \times (\alpha_{p2})^{t^z} + \alpha_{p3},$$

$$p = 1, 2, 3, 4$$

[0041] 式中 $U_{z1}(t^z), U_{z2}(t^z), U_{z3}(t^z), U_{z4}(t^z)$ 分别表示干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线。

[0042] 所述步骤 4) 中, 干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^T(t^b)$ 为: $\bar{y}^T(t^b) = f(U_{z1}(t^b), U_{z2}(t^b), U_{z3}(t^b), U_{z4}(t^b))$, $\bar{y}^T(t^b)$ 通过将烘丝机干尾阶段各工艺变量的优化设定曲线代入所构建的干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的输入变量 $u_1^T(t^b), u_2^T(t^b), u_3^T(t^b), u_6^T(t^b)$ 中得到; 通过使干尾阶段的 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分预测值 $\bar{y}^T(t^b)$ 与出口水分设定值 $y'_{set}(t^b)$ 的误差 $e_T(t^b)$ 最小, 即采用列维布格奈奎尔特方

法求解优化问题 $\min_{\alpha_{pg}} J^T = \sum_{k=1}^{M'} e_T^2(t^b)$, 寻找出干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率

最优输入曲线的参数 α_{pg} ; 其中, $g=1, 2, 3$; M' 是干尾阶段持续时间。

[0043] 与现有技术相比, 本发明所具有的有益效果为: 本发明方法可使干头阶段叶丝出口水分尽可能快地上升、并快速到达稳定状态, 可使干尾阶段叶丝出口水分尽可能缓慢地下降, 从而有效地减少头尾段的干料量, 提高烘丝过程的控制性能, 具有较大的经济价值; 本发明方法综合考虑了来料量与各输入变量间的动态特性, 可以更有效地克服来料流量和水分变化对烘丝过程头尾段的影响, 适用于不同模式下叶丝入口流量与入口水分时的头尾段控制; 本发明方法基于辨识的模型优化出最优的输入设定曲线, 避免了人工整定输入工艺变量参数的不便。

附图说明

[0044] 图 1 为烘丝机工艺过程示意图。

具体实施方式

[0045] 烘丝机工艺过程如图 1 所示。叶丝进入烘丝工序之前,首先检测叶丝的入口流量 u_4 和入口水分 u_5 。经过 T_3 时间,叶丝到达烘丝机入口处。叶丝在烘丝筒烘干时,系统会定时采样筒体的排潮风门开度 u_1 、风温 u_2 、筒温 u_3 等工艺变量参数值。烘干过程持续 T_4 时间,烘干后的叶丝从烘丝筒出口倒出,并在出口处测量叶丝出口水分值 y 。从有入口流量检测值到有出口水分检测值需经历一段较长时间,例如某烘丝生产线大约需 340s。另外,烘丝机的输入 / 输出变量间也具有较大的时滞。

[0046] 当检测到有入口流量时,表明烘丝过程开始运行。运行初期烘丝过程有叶丝入口流量与入口水分检测值,没有叶丝出口水分检测值,此时烘丝过程干头阶段开始。根据烘丝过程干头阶段的特性,建立 Cubic-RBF-ARX 模型结构:

[0047]

$$\begin{aligned}
 y^H(t^H) = & \varphi_0^H + \sum_{i^H=1}^{np^H} \varphi_{i^H}^H y^H(t^H - i^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{1,j^H}^H u_1^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{2,j^H}^H u_2^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{3,j^H}^H u_3^H(t^H - j^H \cdot T_0^H) + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{4,j^H}^H u_4^H(t^H - T_1 - T_3 - j^H \cdot T_0^H) \\
 & + \sum_{j^H=1}^{nq^H} \psi_{5,j^H}^H u_5^H(t^H - T_3 - j^H \cdot T_0^H) + \xi^H(t^H)
 \end{aligned} \tag{1}$$

[0048] 其中:

[0049]

$$\left\{ \begin{array}{l}
\varphi_0^H = \omega_0^{H,0} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{k^H}^{H,0} \left\| X^H(t^H-1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
\varphi_{i^H}^H = \omega_{i^H,0}^{y^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{i^H,k^H}^{y^H} \left\| X^H(t^H-1) - Z_{k^H}^{H,y^H} \right\|_F^3 \\
\psi_{n,j^H}^H = \omega_{n,j^H,0}^{u^H} + \sum_{k^H=1}^{m^H} \omega_{n,j^H,k^H}^{u^H} \left\| X^H(t^H-1) - Z_{k^H}^{H,u^H} \right\|_F^3 \\
X^H(t^H-1) = \begin{bmatrix} u_4^H(t^H-1) & u_5^H(t^H-1) \\ u_4^H(t^H-2) & u_5^H(t^H-2) \\ \vdots & \vdots \\ u_4^H(t^H-d^H) & u_5^H(t^H-d^H) \end{bmatrix}; \\
Z_{k^H}^{H,y} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,y} & z_{k^H,1}^{2,H,y} \\ z_{k^H,2}^{1,H,y} & z_{k^H,2}^{2,H,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,y} & z_{k^H,d^H}^{2,H,y} \end{bmatrix}; Z_{k^H}^{H,u} = \begin{bmatrix} z_{k^H,1}^{1,H,u} & z_{k^H,1}^{2,H,u} \\ z_{k^H,2}^{1,H,u} & z_{k^H,2}^{2,H,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^H,d^H}^{1,H,u} & z_{k^H,d^H}^{2,H,u} \end{bmatrix} \\
T_0^H = [T_4 / nq^H], T_4 = T_2 - T_3 \\
i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H; n = 1, 2, 3, 4, 5
\end{array} \right. \quad (2)$$

[0050] 其中, $y^H(t^H)$ 表示烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分; $u_1^H(t^H)$, $u_2^H(t^H)$, $u_3^H(t^H)$, $u_4^H(t^H)$, $u_5^H(t^H)$ 分别表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的排潮风门开度、风温、筒温、入口流量及入口水分; $X^H(t^H-1)$ 为入口流量和入口水分的状态变量; np^H , nq^H , d^H 和 m^H 均表示干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次; $Z_{k^H}^{H,y}$, $Z_{k^H}^{H,u}$ 分别为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心; $\omega_0^{H,0}$, $\omega_{i^H,0}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,0}^{u^H}$, $\omega_{k^H}^{H,0}$,

$\omega_{i^H,k^H}^{y^H}$, $\omega_{n,j^H,k^H}^{u^H}$ 为干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权系数; $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的

Frobenius 范数; $\xi^H(t^H)$ 是干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的建模误差, 为高斯白噪声; T_0^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间, T_1 为从有入口流量检测值到有入口水分检测值的时间, T_2 为从有入口水分检测值到有出口水分检测值的时间, T_3 为从有入口水分检测值到烘丝筒入口的时间, T_4 为叶丝在烘丝筒烘干的时间。

[0051] 当入口流量由正常值变为 0 时, 标志着干尾过程的开始, 当出口水分下降到 3% 时, 标志着烘丝机整个烘丝过程的结束。干尾过程中无入口流量检测值, 但有出口水分检测值。根据烘丝机干尾过程段的特性, 建立如下的 Cubic-RBF-ARX 模型:

[0052]

$$\begin{aligned}
y^T(t^T) = & \varphi_0^T + \sum_{i^T=1}^{np^T} \varphi_{i^T}^T y^T(t^T - i^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{1,j^T}^T u_1^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{2,j^T}^T u_2^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) \\
& + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{3,j^T}^T u_3^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{4,j^T}^T u_4^T(t^T - T_1 - T_3 - j^T \cdot T_0^T) \\
& + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{5,j^T}^T u_5^T(t^T - T_3 - j^T \cdot T_0^T) + \sum_{j^T=1}^{nq^T} \psi_{6,j^T}^T u_6^T(t^T - j^T \cdot T_0^T) + \xi^T(t^T)
\end{aligned} \quad (3)$$

[0053] 其中：

[0054]

$$\left\{ \begin{aligned}
\varphi_0^T &= \omega_0^{T,0} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{k^T}^{T,0} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\
\varphi_{i^T}^T &= \omega_{i^T,0}^{y^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{i^T,k^T}^{y^T} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,y} \right\|_F^3 \\
\psi_{n,j^T}^T &= \omega_{n,j^T,0}^{u^T} + \sum_{k^T=1}^{m^T} \omega_{n,j^T,k^T}^{u^T} \left\| X^T(t^T - 1) - Z_{k^T}^{T,u} \right\|_F^3 \\
X^T(t^T - 1) &= \begin{bmatrix} u_2^T(t^T - 1) & u_6^T(t^T - 1) \\ u_2^T(t^T - 2) & u_6^T(t^T - 2) \\ \vdots & \vdots \\ u_2^T(t^T - d^T) & u_6^T(t^T - d^T) \end{bmatrix} \\
Z_{k^T}^{T,y} &= \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,y} & z_{k^T,1}^{2,T,y} \\ z_{k^T,2}^{1,T,y} & z_{k^T,2}^{2,T,y} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,y} & z_{k^T,d^T}^{2,T,y} \end{bmatrix}; \quad Z_{k^T}^{T,u} = \begin{bmatrix} z_{k^T,1}^{1,T,u} & z_{k^T,1}^{2,T,u} \\ z_{k^T,2}^{1,T,u} & z_{k^T,2}^{2,T,u} \\ \vdots & \vdots \\ z_{k^T,d^T}^{1,T,u} & z_{k^T,d^T}^{2,T,u} \end{bmatrix} \\
T_0^T &= [T_4 / nq^T], \quad T_4 = T_2 - T_3 \\
i^T &= 1, \dots, np^T; \quad j^T = 1, \dots, nq^T; \quad k^T = 1, \dots, m^T; \quad n = 1, 2, 3, 4, 5
\end{aligned} \right. \quad (4)$$

[0055] 其中， $y^T(t^T)$ 表示烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的出口水分； $u_1^T(t^T)$, $u_2^T(t^T)$, $u_3^T(t^T)$, $u_4^T(t^T)$, $u_5^T(t^T)$, $u_6^T(t^T)$ 分别表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的筒温、热风风温、排潮风门开度、入口流量、入口水分及筒体电机频率； $X^T(t^T - 1)$ 为热风风温和筒体电机频率的状态变量； np^T , nq^T , d^T 和 m^T 均表示干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的阶次； $Z_{k^T}^{T,y}$, $Z_{k^T}^{T,u}$ 分别为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型输出项与输入项的 RBF 神经网络的中心； $\omega_0^{T,0}$, $\omega_{i^T,0}^{y^T}$, $\omega_{k^T}^{T,0}$, $\omega_{n,j^T,0}^{u^T}$, $\omega_{i^T,k^T}^{y^T}$, $\omega_{n,j^T,k^T}^{u^T}$ 为干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的标量权系数； $\xi^T(t^T)$ 是干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模误差，为高斯白噪声； T_0^T 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模采样时间。

[0056] 本发明采用结构化非线性参数优化方法 (SNPOM) 方法对模型进行估计。为了使得上面所构造的 Cubic-RBF-ARX 模型能够描述烘丝过程头尾段的全局动态特性，我们首先采用 SNPOM 方法来优化模型的、一步预测误差最小情形下的参数，并以此参数作为长期预测

优化目标下的模型参数初始值。然后,采用列维布格奈奎尔特方法(LMM)来进行长期预测性能最优的模型参数的优化。

[0057] 烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型(1)的参数优化问题如下:

$$[0058] \quad (\hat{\theta}_N^H, \hat{\theta}_L^H) = \arg \min_{\theta_N^H, \theta_L^H} \sum_{t^{oh}=1}^{N^H} (\bar{y}^H(t^{oh}) - \hat{y}^H(t^{oh}))^2 \quad (5)$$

[0059] 其中, $\hat{y}^H(t^{oh})$ 是烘丝机干头阶段出口水分的实际值, $\bar{y}^H(t^{oh})$ 是在实际输入作用下,由烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值;

$\hat{\theta}_L^H = \left\{ \omega_0^{H,0}, \omega_{i^H,0}^{y^H}, \omega_{n,j^H,0}^{y^H}, \omega_{k^H}^{H,0}, \omega_{i^H,k^H}^{y^H}, \omega_{j^H,k^H}^{u^H} \mid i^H = 1, \dots, np^H; j^H = 1, \dots, nq^H; k^H = 1, \dots, m^H \right\}$ 为烘丝机干头

阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数; $\hat{\theta}_N^H = \left\{ Z_{k^H}^{H,y}, Z_{k^H}^{H,u} \mid k^H = 1, \dots, m^H \right\}$ 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数; N^H 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度。

[0060] 烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型(3)的参数优化问题如下:

$$[0061] \quad (\hat{\theta}_N^T, \hat{\theta}_L^T) = \arg \min_{\theta_N^T, \theta_L^T} \sum_{t^{ot}=1}^{N^T} (\bar{y}^T(t^{ot}) - \hat{y}^T(t^{ot}))^2 \quad (6)$$

[0062] 其中, $\hat{y}^T(t^{ot})$ 是烘丝机干尾过程中出口水分的实际值; $\bar{y}^T(t^{ot})$ 是在实际输入作用下,由烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型计算出的出口水分的预测值;

$\hat{\theta}_L^T = \left\{ \omega_0^{T,0}, \omega_{i^T,0}^{y^T}, \omega_{n,j^T,0}^{y^T}, \omega_{k^T}^{T,0}, \omega_{i^T,k^T}^{y^T}, \omega_{j^T,k^T}^{u^T} \mid i^T = 1, \dots, np^T; j^T = 1, \dots, nq^T; k^T = 1, \dots, m^T \right\}$ 为烘丝机干尾

阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的线性参数, $\hat{\theta}_N^T = \left\{ Z_{k^T}^{j^T,y}, Z_{k^T}^{j^T,u} \mid k^T = 1, \dots, m^T \right\}$ 为烘丝机干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型的非线性参数; N^T 为烘丝机干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型建模数据长度。

[0063] 依据估计出的烘丝过程干头阶段 Cubic-RBF-ARX 模型来设计各工艺变量的最优输入曲线,以适应来料情况的变化,尽量减少干头阶段的干料量。本发明采用双 S 型函数来描述干头阶段排潮风门、风温、筒温的最优输入曲线,采用阶跃型函数来描述入口流量的最优输入曲线。

[0064] 双 S 型曲线公式如下:

$$[0065] \quad U_{sc}(t^s) = \frac{\lambda_1}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_2}{\lambda_3}}} + \lambda_4 + \frac{\lambda_5}{1 + e^{\frac{t^s - \lambda_6}{\lambda_7}}} \quad (7)$$

[0066] 其中, t^s 为输入的时间,单位为 s; $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5$ 分别为双 S 型函数的起点、转折点及终点值; λ_2, λ_6 分别为双 S 型函数的两条对称轴中心位置; λ_3, λ_7 分别为双 S 型函数上升或下降的速度; λ_3, λ_7 大于 0 时表示 S 型函数上升, λ_3, λ_7 小于 0 时表示 S 型函数下降; $c=1, 2, 3, U_{s1}(t^s)$ 是排潮风门的设定值; $U_{s2}(t^s)$ 是风温的设定值; $U_{s3}(t^s)$ 是筒温的设定值。

[0067] 描述入口流量输入曲线的阶跃型函数公式如下:

$$[0068] \quad U_T(t^T) = \begin{cases} \frac{\kappa_1 t^T}{\kappa_2} & t^T \in [1, \kappa_2] \\ \kappa_1 & t^T \in [\kappa_2 + 1, \kappa_3] \end{cases} \quad (8)$$

[0069] 其中, t^T 为输入的时间, 单位为 s; κ_1 , κ_2 , κ_3 分别为阶跃函数的上升速度、上升时间与终值。

[0070] 将各工艺变量的优化设定曲线(7-8)代入所构建的 Cubic-RBF-ARX 模型(1)的输入变量 $u_1^H(t^a)$, $u_2^H(t^a)$, $u_3^H(t^a)$, $u_4^H(t^a)$ 中, 可得到干头阶段出口水分的预测值 $\bar{y}^H(t^a)$:

$$[0071] \quad \bar{y}^H(t^a) = f(U_{s1}(t^a), U_{s2}(t^a), U_{s3}(t^a), U_T(t^a)) \quad (9)$$

[0072] 采用列维布格奈奎尔特(Levenberg-Marquardt Method, LMM)方法, 通过使模型计算出的出口水分预测值与出口水分设定值的误差最小, 寻找出干头阶段排潮风门、风温、筒温最优输入曲线的 λ_i ($i=1, 2, \dots, 7$) 参数和入口流量最优输入曲线的 κ_j ($j=1, 2, 3$) 参数。干头阶段出口水分设定值与基于干头动态模型预测值(9)之间的误差为:

$$[0073] \quad e_H(t^a) = y_{set}(t^a) - \bar{y}^H(t^a) \quad (10)$$

[0074] $y_{set}(t^a)$ 是出口水分设定值。

[0075] 干头阶段工艺变量最优设定的优化问题如下:

$$[0076] \quad \min_{\lambda_i, \kappa_j} J = \sum_{t^a=1}^M e_H^2(t^a) \quad (11)$$

[0077] M 是干头阶段持续时间。通过求解上述优化问题可得到最优设定曲线的参数值, 从而设计出烘丝机干头阶段各个工艺变量的最优输入曲线。

[0078] 依据估计出的烘丝过程干尾阶段 Cubic-RBF-ARX 模型来设计各工艺变量的最优输入曲线, 以适应来料情况的变化, 尽量减少干尾阶段的干料量。采用指数型函数来描述干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线, 该指数型曲线公式如下所示:

$$[0079] \quad U_{zp}(t^z) = \alpha_{p1} \times (\alpha_{p2})^{t^z} + \alpha_{p3} \quad (12)$$

$$p = 1, 2, 3, 4$$

[0080] 式中 $U_{z1}(t^z)$, $U_{z2}(t^z)$, $U_{z3}(t^z)$, $U_{z4}(t^z)$ 分别表示干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率的最优输入曲线。将各工艺变量的优化设定曲线(12)代入所构建的 Cubic-RBF-ARX 模型(3)的输入变量 $u_1^T(t^b)$, $u_2^T(t^b)$, $u_3^T(t^b)$, $u_6^T(t^b)$ 中, 可得到干尾阶段出口水分的预测值:

$$[0081] \quad \bar{y}^T(t^b) = f(U_{z1}(t^b), U_{z2}(t^b), U_{z3}(t^b), U_{z4}(t^b)) \quad (13)$$

[0082] 采用列维布格奈奎尔特(LMM)方法, 通过使模型计算出的出口水分预测值与出口水分设定值的误差最小, 寻找出干尾阶段排潮风门、风温、筒温和筒体电机频率最优输入曲线的 α_{pg} ; 其中, $g=1, 2, 3$ 。干尾阶段出口水分设定值与基于干尾动态模型预测值(13)之间的误差为:

$$[0083] \quad e_T(t^b) = y_{set}^i(t^b) - \bar{y}^T(t^b) \quad (14)$$

[0084] $y_{\text{set}}(t)$ 是出口水分设定值。

[0085] 干尾阶段工艺变量最优设定的优化问题如下：

$$[0086] \quad \min_{\alpha_{pg}} J' = \sum_{k=1}^M e_r^2(t^b) \quad (15)$$

[0087] M 是干尾阶段持续时间。通过求解上述优化问题可得到最优设定曲线的参数值，从而设计出烘丝机干尾阶段各个工艺变量的最优输入曲线。

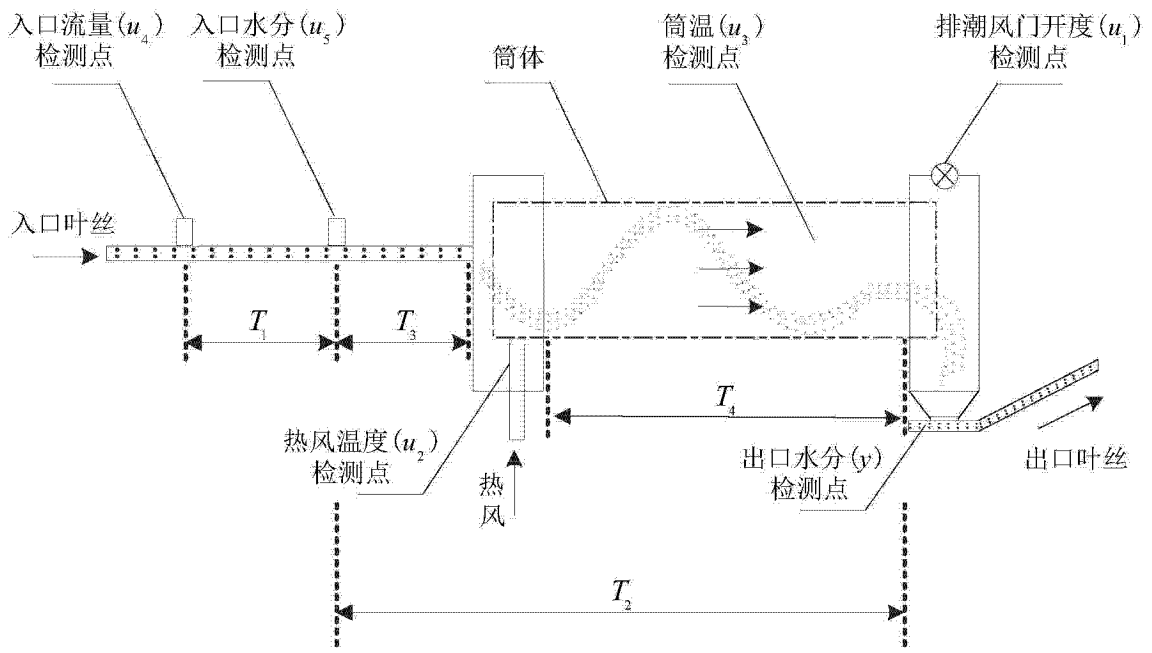


图 1