

基于逆模型解耦的绿茶烘焙变论域模糊控制

李琳, 周国雄

(中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 长沙 414006)

摘要: 绿茶烘焙过程, 伴随着复杂的物质交换和热交换, 温、湿度变化耦合严重。针对这一问题该文提出了一种基于逆模型解耦的变论域模糊控制方法。采用支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法辨识绿茶烘焙过程, 建立精度相对较高逆模型, 根据试验结果, 电热丝电流平均误差为 4.3%, 而风机转速为 8.5%。将该模型并与被控对象进行串联, 建立伪线性系统, 实现温、湿度解耦。同时采用模糊控制器对温、湿度分别进行独立控制, 同时对模糊控制器的论域进行改进, 增强系统的环境适应能力。性能试验结果表明, 该控制系统能够将温度误差控制在小于 1.4℃, 相对湿度控制误差仅为 2.8%; 品质试验表明, 绿茶橙花叔醇成分平均提升 15.2%, α -法呢烯成分平均提升 17.4%, 芳樟醇成分平均提升 14.2%。该文方法能够有效提升绿茶烘焙过程的控制效果, 提供了一种控制绿茶烘焙过程的新途径。

关键词: 模糊控制; 耦合; 模型; 绿茶烘焙; 逆模型; 解耦; 支持向量机; 变论域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.031

中图分类号: TP273⁺.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0258-10

李琳, 周国雄. 基于逆模型解耦的绿茶烘焙变论域模糊控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 258-267.

Li Lin, Zhou Guoxiong. Method of variable universe fuzzy control base on inverse-model decoupling for green tea baking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 258-267. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在绿茶精制过程中, 烘焙工艺起着关键作用, 对茶叶的香气成分、保存时间以及口感有较大的影响^[1]。炭焙和机焙是目前主要的 2 种绿茶烘焙方式。炭焙利用木炭焙笼对绿茶进行烘焙, 主要工艺由人工操作, 烘焙后绿茶的品质取决于工人经验, 因此标准化程度低; 机焙电烘箱进行烘焙, 使用较为广泛, 然而由于缺乏对烘培过程系统温、湿度变化的研究、控制算法较为简单, 温度误差一般大于 5℃, 湿度误差大于 8%^[2], 使得绿茶品质往往达不到最佳效果。因此研究一种先进的绿茶烘焙过程控制方法, 具有十分重要的意义。

烘焙工艺的关键是对温、湿度精确控制, 然而烘焙过程物理、化学变化复杂, 系统温、湿度相互影响, 形成非线性耦合; 同时烘焙过程参数受环境影响变化大, 传统的控制算法往往效果不佳^[3]。

针对上述问题, 本文提出一种基于逆模型解耦的变论域模糊控制方法。首先对烘焙过程的逆模型

进行辨识, 然后将该逆模型与被控对象串联建立伪线性系统, 同时采用变论域模糊控制对温、湿度进行调节, 提升控制系统自调节能力, 提高茶叶品质。

1 机焙原理及控制算法

1.1 机焙原理

机焙工艺的原理以热交换的方式, 释放绿茶半成品中的水分, 达到优化茶叶成分的目的^[4]。以佳友茶叶机械有限公司生产的 6CHX-70 烘焙提香机为例, 主要由加热和抽湿 2 个部分组成, 其中加热部分采用电热丝作为热源, 对加温管道进行加热, 使箱体内部的温度快速升高; 抽湿部分利用风机产生负压, 实现冷风输入和设备内湿热气体排出, 从而带走烘焙过程释放的水分。

绿茶烘焙过程是由一系列复杂的热交换和物质交换组成的。在烘焙过程中, 伴随水分的释放, 茶叶会形成的特殊茶香成分, 从而改变绿茶的口感。因此, 温度和湿度的变化对绿茶品质起着决定性的作用。如何保证烘焙过程中温度和湿度的精确控制, 是烘焙过程的控制重点和难点。

烘焙过程中, 温度和湿度相互影响, 呈现出较强的耦合性。温度升高过快会加快茶叶内部水分的释放, 但无法满足特殊茶香成分生成的温度条件; 反之, 则茶叶水分释放缓慢; 空气流动较快时, 会加速湿气的排出, 也会同时降低茶叶温

收稿日期: 2013-09-10 修订日期: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金 (60975049); 湖南省教育厅高等学校科学研究项目 (12C0437)

作者简介: 李琳 (1977-), 女, 湖南嘉禾人, 中南林业大学讲师, 主要从事电子与自动控制研究。长沙 中南林业科技大学计算机与信息工程学院, 414006。Email: 285570227@qq.com

度，反之，则能够降低对温度的影响，但茶叶水分无法快速释放^[5]。因此，绿茶烘焙过程的温、湿度交叉耦合严重。

通过对机焙原理的分析不难看出，茶烘焙过程的控制重点就是实现温、湿度控制的系统解耦，实现温、湿度的高精度控制。

1.2 逆系统解耦原理

传统的解耦算法有基于状态方程的解耦方法^[6]，基于专家规则的前馈补偿方法等^[7-8]，这类方法要求被控对象数学模型必须明确，对于复杂的绿茶烘焙过程并不适用。基于逆模型的解耦方法，被大量使用在非线性的过程控制领域中^[9-10]，取得了不错的效果。

对于绿茶烘焙过程中，设 $u(t)=[u_1, u_1, \dots, u_p]^T$ ， $p=2$ ，表示风机转速和电热丝电流两维输入； $y(t)=[y_1, y_1, \dots, y_q]^T$ ， $q=2$ ，表示温、湿度两维实际输出； Σ 为多变量耦合的非线性系统。将输入输出关系用状态方程进行表示：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(s, u) \\ y = h(s, u), s(t_0) = s_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 为系统状态，如绿茶烘焙过程电热丝电流热特性、空气流动情况等物理、化学动态特性，为绿茶烘焙系统的内部变量； \dot{x} 为系统状态向量函数，表征了绿茶烘焙的动态过程中，物理、化学动态特性等系统内因与风机转速和电热丝电流二维输入间的关系， f 表示系统状态方程用于表示 \dot{s} ； u 为系统输入，包括风机转速和电热丝电流； y 为系统输出，包括温、湿度两维实际输出； h 为系统输出方程，表示绿茶烘焙系统的输出与内部状态及输入的关系； s_0 表示初始时刻绿茶烘焙系统的内部状态； t_0 表示系统初始时刻。

将绿茶烘焙控制系统的输入、输出变量之间的映射关系，即风机转速和电热丝电流与温、湿度的关系，表示为 θ ，则有 $y = \theta u$ 。

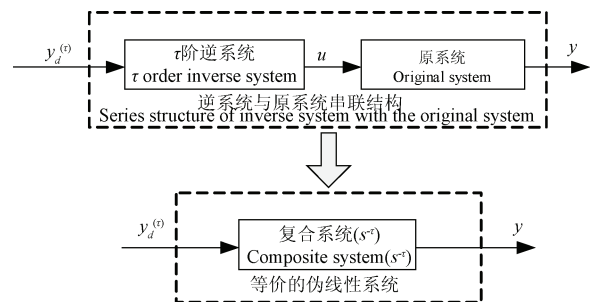
原绿茶系统 Σ 的逆系统为 Π ，则逆系统 Π 的输入输出间映射关系可表示为 $u_d = \bar{\theta} y_d$ ，且需满足 $\bar{\theta} \theta y_d = \theta u_d = y_d$ 。其中， u_d 为逆系统 Π 的输出，即风机转速和电热丝电流； y_d 为逆系统 Π 的输入，即温、湿度， $\bar{\theta}$ 为 u_d 和 y_d 之间的映射关系。

由于逆系统辨识会引入 τ 阶滞后，因此实际的 τ 阶逆系统 Π_τ 的输入输出间映射关系为 $u_d = \bar{\theta}_\tau y_d^{(\tau)}$ ， $y_d^{(\tau)}$ 表示温、湿度的 τ 阶滞后变量； $\bar{\theta}_\tau$ 表示引入 τ 阶滞后条件下， u_d 和 y_d 之间的逆映射关系，满足： $\bar{\theta}_\tau \theta y_d^{(\tau)} = \theta u_d = y_d$ 。

将逆系统 Π_τ 串联在原系统 Σ 之前，构成新的复合绿茶烘焙控制系统，如图 1 所示。此时

$$y_d^{(\tau)} = \frac{1}{\bar{\theta}_\tau \theta} y_d$$

由于 $\bar{\theta}_\tau$ 为 θ 的 τ 阶滞后逆映射， $\bar{\theta}_\tau \theta$ 实际等价于线性 τ 阶积分项 $s^{-\tau}$ 。不难看出，新系统的输入，即经过 τ 阶积分处理温、湿度变量与输出，即原系统温、湿度变量之间为线性映射关系；但内部仍存在非线性映射，因此该复合系统称为伪线性系统。对于绿茶烘焙过程这类多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 系统，采用逆模型方法，建立伪线性系统，能够实现非线性系统线性化与解耦，采用线性系统控制方法即可满足控制要求。

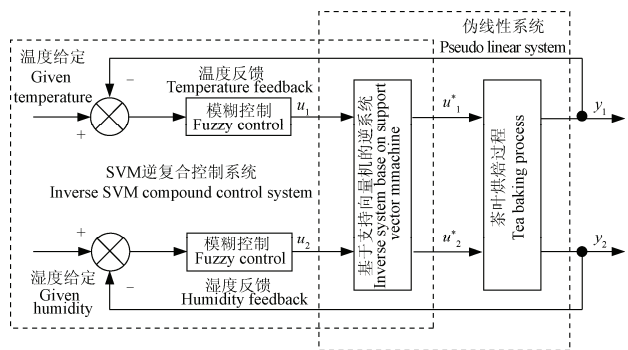


注： $y_d^{(τ)}$ 为 τ 阶逆系统输入； u 为原系统输入； y 为原系统输出
Note: $y_d^{(τ)}$ is input of τ order inverse system; u is input of original system; y is output of original system

图 1 逆系统解耦原理
Fig.1 Principle of inverse system decoupling

1.3 控制算法

针对绿茶烘焙控制系统中存在的问题，本文提出了一种基于逆模型的变论域模糊控制方法，其结构如图 2 所示。



注： u_1 为模糊控制器计算的电热丝电流调节量； u_2 为模糊控制器计算的风机转速调节量； u_1^* 为电热丝电流调节量， u_2^* 为实际风机转速调节量； y_1 为温度输出； y_2 为湿度输出
Note: u_1 is current of electric heating wire calculated by fuzzy controller; u_2 is fan speed calculated by fuzzy controller; u_1^* is actual current of electric heating wire, u_2^* is actual fan speed; y_1 is temperature output; y_2 is humidity output

图 2 基于逆模型的控制系统结构
Fig.2 Structure of control system base on inverse mode

整个控制系统由基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 的逆系统解耦, 以及基于变论域模糊算法的温、湿度独立控制 2 部分组成。

基于 SVM 的逆系统, 利用 SVM 的自学习能力强优势^[11], 对绿茶烘焙系统的逆向辨识, 并与原系统进行串联, 构成复合伪线性系统。实现烘焙控制系统中温度与湿度的解耦, 为利用线性系统控制方法对烘焙过程进行控制打下基础。

变论域模糊算法, 首先根据温、湿度设定值和系统检测反馈值, 分别实现对温、湿度独立闭环模糊控制; 然后采用变论域模糊算法, 解决系统器件参数变化和传感器参数漂移对固定规则模糊算法的影响, 提升系统控制精度和环境适应性。

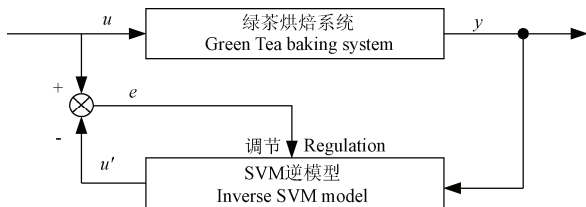
2 基于 SVM 的逆模型辨识

绿茶烘焙过程复杂, 逆系统呈高度非线性状态, 难以精确构造。一些学者利用基于专家规则的前馈补偿方法对茶叶烘焙过程进行解耦控制^[12], 其控制算法环境适应性较差。

SVM 算法由 Vapnik 等^[13]于 1995 年提出, 对非线性数据, 学习能力较强, 具有严格的理论基础和数学基础, 因此对数据的依赖性较弱, 不存在局部最小问题。

目前 SVM 算法有许多实现方法, 其中最小二乘支持向量机 (least square support vector machine, LS-SVM)^[14], 采用线性方程组方式进行求解, 训练效率极高, 实现简便, 因此本文采用 LS-SVM 方法建立绿茶烘焙逆系统。

基于 SVM 的绿茶烘焙系统建立方法如图 3 所示。 y 表示为原系统的输出, 即温度、湿度检测值, 逆系统中作为输入样本; u 表示原系统的输入, 即电热丝电流以及风机转速, 逆系统中为作为输出样本。 u' 表示 SVM 训练结果, e 表示 u 和 u' 的误差, 作为调节 SVM 的训练过程的指标。



注: y 为原系统的输出, 即温度、湿度检测值; u 为原系统的输入, 即电热丝电流以及风机转速; u' 为 SVM 训练结果; e 为 u 和 u' 的误差。
Note: y is the output of the original system (temperature, humidity detection value); u is the original system (electric heating wire current and rotate speed of fan) input; u' is the result of SVM training; e is error between u and u' .

图 3 基于支持向量机的逆模型辨识原理

Fig.3 Principle of inverse modeling base on SVM (support vector machine)

对于绿茶烘焙逆系统训练样本集 (x_i, y_i) , (其中, $i=1, 2, \dots, n; x_i \in R^n$, x_i 表示输入样本, 即温度、湿度检测值按控制周期组成的时间序列; $y_i \in R$, R 表示实数域, 为对应的输出样本), 输入样本为绿茶烘焙设备的温度检测值和湿度检测值, 输出样本为风机转速和电热丝电流, 可以看出由于灰色相关性分析的作用, 维度大大降低。SVM 的思想是: 通过对样本数据的学习, 寻找非线性映射 φ 逼近输入空间到输出空间的关系, 在高维特征空间 F 中^[15], 利用公式 (2) 对估计函数进行线性回归^[16]。从而实现将烘焙过程逆系统辨识这一低维空间非线性回归问题, 等价于在高维空间的线性回归问题。

$$g(x) = [\omega \times \varphi(x)] + b \quad \varphi: R^n \rightarrow F, \omega \in F \quad (2)$$

式中: b 为阈值; ω 为线性回归系数, 表示辨识风机转速和电热丝电流与温度、湿度的关系; φ 为输入空间到输出空间的非线性映射规则, x 为温度、湿度检测样本, R^n 为实数空间, F 为高维特征空间, $g(x)$ 表示烘焙过程逆系统回归模型。

这一高维空间的线性回归问题可以等价转换为公式 (3):

$$\begin{aligned} R_{reg}(f) &= R_{emp}(f) + \lambda \|\omega\|^2 \\ &= \sum_{i=1}^s C(e_i) + \lambda \|\omega\|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\|\omega\|^2$ 为 f 在高维空间 F 中平坦的复杂性; $R_{reg}(f)$ 为目标函数; λ 为调整常数; s 为样本数量; C 为错误惩罚因子, e_i 为误差序列; $R_{emp}(f)$ 表示经验函数。

利用线性不敏感损失函数良好的稀疏性, 可以建立损失函数如公式 (4) 所示。

$$|y - g(x)|_\varepsilon = \max\{0, |y - g(x) - \varepsilon|\} \quad (4)$$

式中: ε 为不敏感损失参数, y 为实际的输出样本, 即风机转速和电热丝电流检测值。

在此基础上, 构造经验风险函数如式 (5) 所示。

$$R_{emp}^\varepsilon(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - g(x)|_\varepsilon \quad (5)$$

式中: $R_{emp}^\varepsilon(f)$ 为经验风险估计值, 用于评价 SVM 建立的温、湿度检测值与电热丝电流以及风机转速的逆模型的精确度, n 为样本数量。

按照最小化结构风险的目标, 在高维空间 F 的最优化问题, 可等价转换为极小化目标函数问题^[17], 如公式 (6) 所示。

$$\begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + D \sum_{i=1}^n (\xi_i^* + \xi_i) \right\} \\ y_i - \omega \cdot \varphi(x) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \omega \cdot \varphi(x) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： D 为常量表示模型复杂项权重参数； ξ_i 、 ξ_i^* 为松弛因子； φ 为输入空间到输出空间的非线性映射规则。通过引入拉格朗日乘子，该极小化问题可进一步转化为式 (7) 所示对偶问题。

$$\begin{cases} \max = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i^* - a_i)(\alpha_j^* - a_j) K(x_i, y_j) x \\ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - a_j) K(x_i, y_j) \\ + \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (y_i - \varepsilon) - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i - \varepsilon) \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* \\ 0 \leq \alpha_i^* \leq D \\ 0 \leq \alpha_i \leq D \end{cases} \quad (7)$$

式中： x_i 为温度、湿度检测值按控制周期组成的时间序列样本， y_i, y_j 为风机转速和电热丝电流检测值的第 i 个样本值和第 j 个样本值， α_i, α_i^* 为 x_i 对应的拉格朗日乘子， α_j, α_j^* 为 y_j 对应的拉格朗日乘子

引入核函数方法，可将 LS-SVM 问题转化线性方程组求解问题，如式 (8) 所示：

$$\begin{bmatrix} 0 & \bar{1}^T \\ \bar{1} & \Omega + C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： I 表示单位矩阵； $\Omega_{i,j}$ 为核函数， $\Omega_{i,j} = k(x_i, x_j) = \psi(x_i)\psi^T(x_j)$ ， $i, j = 1, 2, \dots, l$ ， $Y = [y_1, y_2, \dots, y_l]$ ， $a = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l]$ ， $b = [b_1, b_2, \dots, b_l]$ ， $\bar{1} = [1, 1, \dots, 1]$ ， Y 为输出矩阵，由风机转速和电热丝电流检测值样本组成， a 为拉格朗日乘子组成向量， b 为阈值向量。

核函数 $K(x_i, x_j) = \psi(x_i)\psi^T(x_j)$ ， $\psi(x_i), \psi^T(x_j)$ 为构成核函数的函数矩阵，满足 Mercer 条件的任意对称函数。对于绿茶烘焙 SVM 逆模型辨识问题来说，核函数的选取直接决定了逆模型精度。核函数的具体实现方法较多，本文采用的高斯核函数能够自动选择最佳的隐节点数目和隐节点中心，如式 (9) 所示。

$$K(x_i, x_j) = \exp \left[-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2} \right] \quad (9)$$

式中： $K(x_i, x_j)$ 为核函数， σ 为高斯函数平滑程度参

数， x_i, x_j 为温度、湿度检测值按控制周期组成的时间序列样本的第 i 个样本值和第 j 个样本值。

最后，基于最优化条件 (karush-kuhn-tucker, KKT) 可对公式 (8) 中的阈值 b 进行求解，得到 SVM 回归函数如式 (10) 所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (10)$$

从而完成对绿茶烘焙系统逆模型的辨识。

3 变论域模糊控制

绿茶烘焙过程温度和湿度控制，是保证绿茶品质的重点。在烘焙过程中，温度和湿度变化受到多种因素的影响，呈现非线性、大时滞的特点，风机转速、电热丝电流等调节量和温、湿度之间的关系无法用确定的数学模型进行描述，因此经典控制算法效果不佳。模糊控制不依赖于被控对象模型，以稳定温度和湿度为目标，结合专家经验制定相对较优的控制率；同时由于采用模糊化方法对输入和输出量进行处理，降低了电烘箱结构、密闭性等因素对控制效果的影响^[18]，能够呈现较好的控制效果。

绿茶烘焙过程中，温、湿度传感器检测精度、风机的性能曲线会随着具体温度、气压等环境因素的变化而产生漂移，这些问题给绿茶烘焙过程控制的精确性和稳定性带来困难。常规模糊控制器的精度与模糊规则数量以及系统复杂度成正比^[19]；但规则数量的增加，会使控制算法对于环境的适应性下降。因此常规模糊控制难以同时满足系统精度和环境的自适应能力的要求。变论域模糊控制方法能在不增加模糊规则的前提下，使论域随误差扩大而扩大或随误差缩小而缩小，从一定程度上解决了上述问题^[20]，从而满足绿茶烘焙温、湿度控制要求。

3.1 模糊控制器的设计

温、湿度模糊控制器均采用单输出双输入结构。其中温度模糊控制器，输入为绿茶烘焙温度与设定值偏差 e_1 和偏差变化率 ec_1 ，输出为电热丝电流调节量 u_1 。绿茶烘焙温度与设定值偏差 e_1 的具体划分为 7 级：{PB 正向偏大，PM 正向适中，PS 正向偏小，ZO 适中，NS 负向偏小，NM 负向适中，NB 负向偏大}，其论域 E_1 为： $[-8, 8]$ 。绿茶烘焙温度与设定值偏差变化率 ec_1 划分为 5 级：{PB 正向偏大，PM 正向适中，ZO 适中，NM 负向适中，NB 负向偏大}，其论域 EC_1 为： $[-6, 6]$ 。电热丝电流调节量 u_1 划分为 7 级：{PB 快速降温，PM 中速降温，PS 微量降温，ZO 保持，NS 微量升温，NM 中速升温，NB 快速升温}，其论域 U_1 为： $[-7, 7]$ 。

湿度模糊控制器，输入为湿度与设定值偏差 e_2 和偏差变化率 ec_2 ，输出为风机转速调节量 u_2 。湿

度与设定值偏差 e_2 具体划分为 7 级: {PB 正向偏大, PM 正向适中, PS 正向偏小, ZO 适中, NS 负向偏小, NM 负向适中, NB 负向偏大}, 其论域 E_2 为: $[-6, 6]$ 。湿度与设定值偏差变化率 ec_2 划分为 5 级: {PB 正向偏大, PM 正向偏小, ZO 适中, NM 负向偏小, NB 负向偏大}, 其论域 EC_2 为: $[-7, 7]$ 。风机转速调节量 u_2 划分为 7 级: {PB 快速降速, PM 中速降速, PS 微量降速, ZO 保持, NS 微量增速, NM 中速增速, NB 快速增速}, 其论域 U_2 为: $[-5, 5]$ 。

温、湿度模糊控制器按照下列内容和原则进行设计。

1) 隶属度函数

隶属度函数的选择是决定模糊控制器性能的关键, 为了满足抑制超调的同时尽快消除偏差的要求。当偏差较高时, 以尽快消除偏差为目标; 而当偏差较小时, 以抑制超调, 保证稳定性和精度为目标。因此, e_1 、 e_2 、 ec_1 、 ec_2 、 u_1 、 u_2 的隶属度函数都采用梯形隶属函数。

2) 模糊控制规则

根据绿茶烘焙过程专家控制经验, 温、湿度控制策略均按照偏差较大时以快速逼近设定值为目标进行调节, 偏差较小时确保控制精度为原则进行细调节的原则, 总结出如表 1 所示模糊控制规则。

表 1 推理语言规则表

Table 1 Rules table of reasoning language

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PB	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

注: EC 为偏差变化率, E 为偏差, PB 正向偏大, PM 正向适中, PS 正向偏小, ZO 适中, NS 负向偏小, NM 负向适中, NB 负向偏大。

Note: EC is deviation change rate; E is a deviation; PB means positive big; PM means positive middle; PS means positive small; ZO means zero; NB means negative big; NM means negative middle; NS means negative small.

3) 模糊化

茶叶烘焙过程中, 由于热电偶、湿度检测装置量程的限制, 温、湿度检测量不可能为任意值。考虑这一限制, 模糊控制器温度、湿度输入的模糊化, 即各温度、湿度检测值到各自论域的映射关系, 采用如公式 (11) 所示方法进行模糊化计算:

$$E = L \times \frac{e - (e_L - e_H) / 2}{(e_L - e_H) / 2} \quad (11)$$

式中: L 表示论域的取值范围, e_L, e_H 分别抽象表示温度、湿度检测的最小取值和最大取值, E 为温度、湿度的模糊化结果。

4) 模糊推理、解模糊并计算模糊控制查询表。

模糊控制过程中, 控制变量的计算必须按照模糊规则进行模糊推理得到^[21], 在本文采用基于加权平均法的Mamdani推理。

3.2 变论域参数设计

随着温、湿度检测值和设定值误差的减小, 为了在不增加模糊规则的前提下, 实现精确控制, 需要更细致的划分输入论域^[22-23]。因此本文引入输入论域伸缩因子 $a = [a_1, a_2]$, ($0 < a_1 \leq 1, 0 < a_2 \leq 1$) 和输出论域的伸缩因子 β , 得到新论域, 如公式 (12) 所示。

$$\begin{cases} E_1(m_1) = [-a_1(m_1)L_{e1}, a_1(m_1)L_{e2}] \\ E_2(m_2) = [-a_2(m_2)L_{e2}, a_2(m_2)L_{e2}] \\ U(m_1, m_2) = [-\beta(m_1, m_2)L_u, -\beta(m_1, m_2)L_u] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $a = [a_1, a_2]$ 为输入论域的伸缩因子; β 为输出论域的伸缩因子; m_1, m_2 为模糊控制器的 2 个输入, 本文中分别为温、湿度偏差和湿度偏差变化率。 L_{m1} 、 L_{m2} 为输入论域的取值范围, L_u 为输出论域的取值范围, $E_1(m_1)$, $E_2(m_2)$ 为模糊控制器输入论域, $U(m_1, m_2)$ 为模糊控制器输入论域。

将常规模糊控制器的输出用 F_{cf1g} 表示, 则根据变论域控制器的原理, 其输出可用公式 (13) 表示。

$$F_{v1g}(m_1, m_2) = \beta(m_1, m_2) \cdot F_{cf1g}(m_1/a_1(m_1), m_2/a_2(m_2)) \quad (13)$$

式中: $F_{v1g}(m_1, m_2)$ 表示变论域控制器输出。

伸缩因子 $a = [a_1, a_2]$, β 的计算方法是决定变论域控制器控制效果的关键^[24], 综合考虑系统精确性、计算性能和稳定性, 本文选用积分法计算伸缩因子, 如公式 (14) 所示。

$$\begin{cases} a_1(e_1) = 1 - \lambda \exp(-Km_2^2), \lambda \in (0, 1), K > 0 \\ a_2(e_1) = 1 - \lambda \exp(-Km_2^2), \lambda \in (0, 1), K > 0 \\ \beta(t) = \left| K \int_0^1 (p_1 \cdot m_1(t) + p_2 \cdot m_2(t)) dt + \beta(0) \right|, K > 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: K 为常量表示比例因子, p_1, p_2 可离线计算获取, 表示为李亚普洛夫方解的最后一列^[25]; λ 为伸缩幅度调节量。

本文中论域调节的原则为, 在偏差较小时压缩论域; 偏差较大时恢复论域, 即进行论域压缩仅对零点附近的模糊子集 ZO 有效^[26]。因此温、湿度偏差按照公式 (15) 进行调节、温湿度偏差变化率的伸缩因子按照公式 (16) 进行调节。

$$a_1(e) = \begin{cases} 1 - \lambda \exp(-Km_1^2), \lambda \in (0, 1), K > 0 \\ \quad \text{当 } |m_{1\text{设定}} - m_1| < \gamma \\ 1 \quad \text{当 } |m_{1\text{设定}} - m_1| \geq \gamma \end{cases} \quad (15)$$

$$a_2(e) = \begin{cases} 1 - \lambda \exp(-K m_2^2), \lambda \in (0, 1), K > 0 & \text{当 } |m_{2\text{设定}} - m_2| < \gamma \\ 1 & \text{当 } |m_{2\text{设定}} - m_2| \geq \gamma \end{cases} \quad (16)$$

式中： $m_{1\text{设定}}$ 为温、湿度偏差门限设定值； $m_{2\text{设定}}$ 为湿度偏差变化率门限设定值； γ 为偏差范围设定值。

模糊控制器在 $t=0$ 时刻，输出论域的伸缩因子记为 $\beta(0)$ ，需要根据绿茶烘焙系统实际情况进行调整，本文取 $\beta(0)=1$ 。结合公式 (15)、(16) 和公式 (13) 中可得如公式 (17) 所示模糊控制器的控制律。

$$F_{\text{verge}}(t) = \left| K \int_0^t (p_1 \cdot m_1(t) + p_2 \cdot m_2(t)) dt + \beta(0) \right| U \cdot F_{\text{cf}lg} \quad (17)$$

式中： U 表示输出论域。

模糊控制器软件实现流程图如图 4 所示。

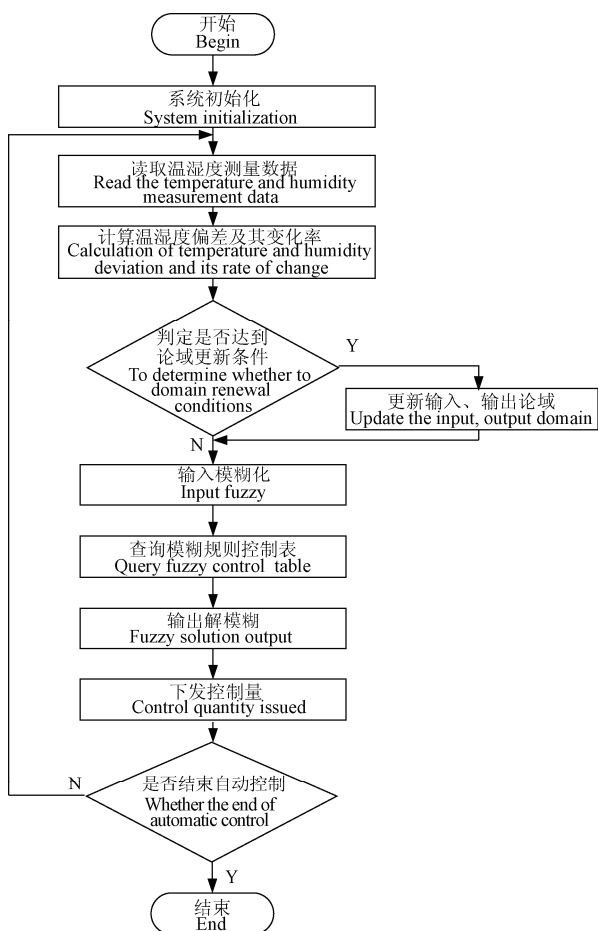


图 4 模糊控制器软件流程

Fig.4 Chart of software flow for fuzzy controller

4 仿真与试验

本文首先针对逆模型辨识方法进行仿真试验，验证方法的可行性；然后采用对比试验的方式，算法的有效性；最后从系统性能，茶叶品质 2 个方面

对控制系统进行分析和评价。

4.1 逆模型仿真试验

本文采用 SVM 方法对绿茶烘焙过程逆模型进行辨识。辨识样本来自某绿茶电烘焙箱正常工作中产生的 1 500 组温度、湿度、电热丝电流、风机转速的实测数据；选用其中 500 组烘焙过程数据作为试验样本。图 5 和图 6 分别为利用逆模型拟合得到的电热丝电流仿真曲线，和风机转速仿真曲线。

从图 5、6 中可以看出，对绿茶烘焙这一复杂过程，SVM 能够依据少量数据样本，进行有效辨识，建立精度相对较高逆模型，其中电热丝电流平均误差仅为 4.3%，而风机转速为 8.5%，这主要是因为原系统的温、湿度变化存在一定的滞后性，导致电热丝电流仿真曲线，和风机转速仿真曲线与实际测量值均存在一定的相位误差，在实际应用中，可以通过相位补偿的方法，进行修正。

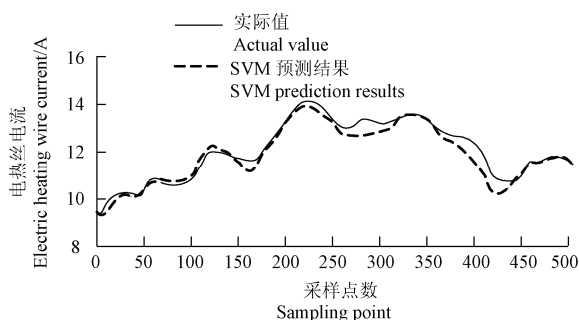


图 5 电热丝电流仿真曲线

Fig.5 Simulation curve of thermocouple current

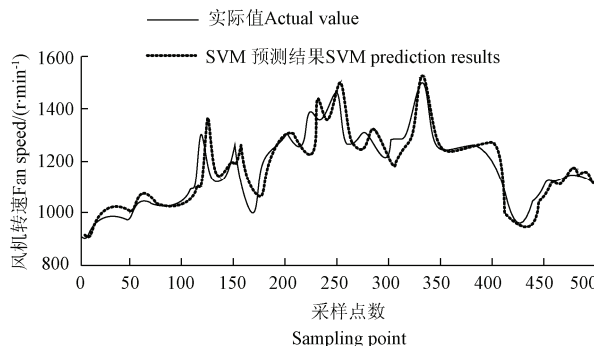


图 6 风机转速仿真曲线

Fig.6 Simulation curve of fan speed

4.2 系统性能试验

试验样本选用产自杭州西湖区的龙井茶半成品，分为 2 份各 5 kg，用于对比试验。采用绿茶烘焙过程中常用的比例、积分、微分控制算法 (proportion、integration、differentiation, PID) [27] 与本文提出的基于 SVM 逆模型解耦的变论域模糊控制方法，对系统性能进行对比试验。其中，温度设定值为 70℃，相对湿度设定值为 30%。

图7和图8分别为在烘焙过程中温、湿度变化试验对比曲线。由于采用了逆模型解耦的控制方法,有效的降低了温、湿度间的耦合性,温湿度控制量能够直接作用于被控对象,而不会互相干扰,大大缩短了温、湿度控制的系统响应时间;同时由于采用了变论域模糊控制,稳态误差也进一步缩小,系统的精度大大提升。

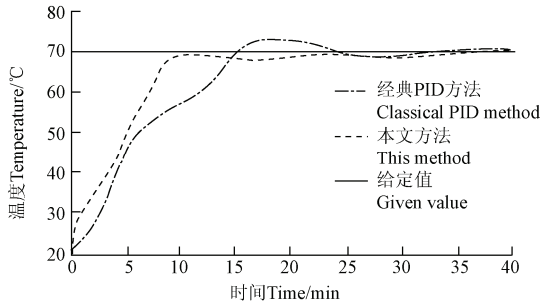


图7 温度对比试验曲线

Fig.7 Curve of temperature comparative experiments

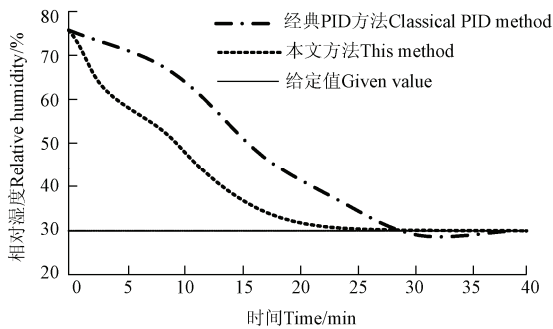


图8 湿度对比试验曲线

Fig.8 Curve of humidity comparative experiments

从数据分析可知,本文本法可将温度控制误差限制在 1.4°C 以下,相对湿度误差仅为 2.8% 。而PID控制算法温度控制误差为 5.2°C ,相对湿度误差为 7.6% ,可以看出本文算法具有明显优势。

4.3 烘焙品质试验

烘焙品质试验的样本选用杭州西湖区的龙井茶、江苏省东山的碧螺春、安徽黄山地区的黄山毛峰,每种茶样各 5 kg 一分为二,用于PID控制方法和本文方法的对比试验。在温度设定值为 70°C ,相对湿度设定值为 30% 的条件下,为防止烘焙时间过长导致的茶叶变质,2组试验的烘培过程均设定为相同时间长度(37 min)。对处理后的各品种茶叶成品进行感官和香气成分评定。

本文根据文件NY/T787-2004所规定的一般方法对上述6组茶样进行感官审评对比试验^[28],其中外形占 10% ,香气占 30% ,叶底占 10% ,滋味占 30% ,汤色占 20% 。具体得分如表2所示。

表2 感官审评试验对比试验结果

感官审评 Sensory evaluation	滋味(30%) Taste (30%)		香气(30%) Aroma (30%)		汤色(20%) Soup color (20%)		叶底(10%) Leaf (10%)		外形(10%) Shape (10%)	
	PID	本文 This paper	PID	本文 This paper	PID	本文 This paper	PID	本文 This paper	PID	本文 This paper
龙井茶 Longjing green tea	26.3	29.3	27.3	29.2	18.3	19.5	7.6	9.4	8.6	9.4
碧螺春 Biluochun Tea	25.7	28.8	25.2	27.8	17.1	19.2	8.6	9.8	8.4	9.6
黄山毛峰 Huangshan Mao Feng	25.1	28.3	24.7	28.5	18.2	18.9	7.5	9.6	8.8	9.8

采用PID方法烘焙的3组茶样感官评定平均分为 85.8 分,采用本文方法烘焙的3组茶样的感官评定平均分为 95.7 分。由此可见本文方法在感官审评上,远远优于PID控制方法。

本文采用常用的香精油提取方法^[29],对3类绿茶样本进行成分对比试验。重点关注橙花叔醇、 α -法呢烯、芳樟醇^[30],3种赋香物质在烘焙后的茶叶成品中的所占比例。

3组茶样主要成分质量分数如表3所示,其中氨基酸、茶多酚、儿茶素含量有一定的提升,香气成分橙花叔醇成分平均提升 15.2% , α -法呢烯成分平均提升 17.4% ,芳樟醇成分平均提升 14.2% 。

表3 主要成分质量分数对比试验结果

含量对比 Concentration	龙井茶 Longjing green tea		碧螺春 Biluochun Tea		黄山毛峰 Huangshan Mao Feng	
	PID	本文	PID	本文	PID	本文
氨基酸 Amino acid/%	1.76	1.82	1.68	1.78	1.52	1.64
茶多酚 Epigallocatechin gallate/%	30.3	34.5	26.5	29.7	24.8	28.3
儿茶素 Epicatechin/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	117.5	134.1	108.4	123.5	103.7	125.4
水浸出物 Aqueous extract/%	33.11	33.02	33.07	33.45	29.7	30.5
橙花叔醇 Nerolidol/%	16.8	19.3	15.7	18.06	14.6	16.79
α -法呢烯 Alpha farnesene/%	8.16	9.57	7.46	8.75	6.54	7.76
芳樟醇 Linalool/%	5.12	5.84	4.69	5.35	4.78	5.45

由此可见由于本文方法,减少了耦合,实现了温、湿度的精密控制,成品茶叶品质比现有的控制方法有了进一步的提升。

5 结论

本文在对绿茶烘焙过程工艺原理深入分析的基础上,针对绿茶烘焙过程中,物理化学复杂,温、湿度耦合严重的问题,提出了一种基于支持向量机

(support vector machine, SVM) 逆模型解耦的变论域模糊控制方法。采用最小二乘支持向量机 (least square support vector machine, LS-SVM) 方法对烘焙过程进行逆系统辨识, 并与原系统进行串联, 建立伪线性系统, 实现温、湿度解耦。同时采用模糊控制器对温、湿度独立控制, 利用变论域理论对模糊控制论域进行改进, 增强系统的环境适应能力。采用该控制系统, 对 3 种绿茶样品进行对比试验, 温度控制误差小于 1.4°C , 相对湿度误差仅为 2.8%, 而比例、积分、微分控制算法 (proportion、integration、differentiation, PID) 温度控制误差为 5.2°C , 相对湿度误差为 7.6%。感官评审平均得分为 95.7, 优于 PID 控制算法的平均 85.8 的得分, 橙花叔醇成分平均提升 15.2%, α -法呢烯成分平均提升 17.4%, 芳樟醇成分平均提升 14.2%。性能和品质实现证明了本文方法的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] 朱跃进, 张海华, 张士康. 茶与烘焙食品结合的研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2011, 11(3): 34-36.
Zhu Yuejin, Zhang Haihua, Zhang Shikang. Review of researches on the incorporation of tea with bakery Food[J]. China Tea Processing, 2011, 11(3): 34-36. (in Chinese with English abstract)
- [2] Lin Rongchuan, Lin Qingjiao, Lin Hetong. Small-overshoot control of temperature system based on fuzzy-PID for Tieguanyin tea roaster[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 40(5): 474-477.
- [3] 张俊, 唐德松, 龚淑英, 等. 烘焙处理对夏秋绿茶香气品质的影响[J]. 中国食品学报, 2010, 23(6): 72-75.
Zhang Jun, Tang Desong, Gong Shuying. Effect of baking on the aroma quality green tea summer gong shuying[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 23(6): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [4] 敖存, 龚淑英, 张俊. 烘焙技术对中低档绿茶滋味品质改善的研究[J]. 茶叶, 2010, 10(1): 52-57.
Ao Cun, Gong Shuying, Zhang Jun. Effect of baking technology on taste of middle and low quality green tea[J]. Tea, 2010, 10(1): 52-57. (in Chinese with English abstract)
- [5] 林文士. 清香型安溪铁观音特殊品质形成的加工工艺[J]. 安徽农学通报, 2005, 15(5): 194-198.
Lin WenShi. Fen Anxitiieguanyin special quality formation process[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2005, 15(5): 194-198. (in Chinese with English abstract)
- [6] 顾敏明, 潘海鹏. 湿度专家控制系统的设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007, 16(4): 20-22.
Gu Minming, Pan Haipeng. The design and realization of an expert control system for humidity[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2007, 16(4): 20-22. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赖旭芝, 周国雄, 曹卫华, 等. 焦炉集气管的模糊专家控制方法及其应用[J]. 控制工程, 2006, 13(2): 108-110.
Lai Xuzhi, Zhou Guoxiong, Cao Weihua, et al. Method and application of fuzzy-expert control system in coke-oven for gas collector pressure[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 108-110. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴敏, 周国雄, 雷琪, 等. 多座不对称焦炉集气管压力模糊解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 25(1): 50-53.
Wu Min, Zhou Guoxiong, Lei Qi, et al. Fuzzy decoupling control for gas pressure of collector for coke-ovens with asymmetry[J]. Control Theory & Applications, 2010, 25(1): 50-53. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周国雄, 赖旭芝, 曹卫华, 等. 焦炉集气管压力智能解耦控制系统的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(3): 558-561.
Zhou Guoxiong, Lai Xuzhi, Cao Weihua, et al. Application of intelligent decoupling control system for coke-oven collector pressure[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(3): 558-561. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘娣, 李宏胜, 林健. 基于网络逆系统的迭代学习初始控制量确定[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(5): 1041-1042.
Liu Di, Li Hongsheng, Lin Jian. Initial control value determination of iterative learning based on network inverse system[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(5): 1041-1042. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王正齐, 刘贤兴. 基于神经网络逆系统的无轴承异步电机非线性内模控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 432-435.
Wang Zhengqi, Liu Xianxing. Nonlinear internal model control for bearingless induction motor based on neural network inversion[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 432-435. (in Chinese with English abstract)

- [12] 林荣川, 林河通, 林清娇. 采用交叉补偿解耦的乌龙茶自动烘焙机温湿度模糊控制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 80—85.
Lin Rongchuan, Lin Hetong, Lin Qingjiao. Fuzzy control of temperature and humidity of Oolong-tea automatic roaster based on cross-compensation decoupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [13] Vladimir Vapnik. Support-vector networks[Z]. Proc. of the 25th Machine Learning, Boston, 1995.
- [14] Bo Cuimei. Research on the modeling method based on eliding time window for support vector machine soft-sensing[J]. Automatic Instrument, 2006, 27(1): 45—51.
- [15] 韦振中, 黄廷磊. 基于支持向量机和遗传算法的特征选择[J]. 广西工学院学报, 2006, 17(2): 103—106.
Wei Zhenzhong, Huang Tinglei. Feature selection based on SVM and GA[J]. Journal of Guangxi University of Technology, 2006, 17(2): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [16] 綦宏志, 许敏鹏, 明东, 等. P300 Speller 中基于 AdaBoost SVM 的导联筛选研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 26(5): 53—57.
Qi Hongzhi, Xu Minpeng, Ming Dong, et al. Study of channel selection based on AdaBoost SVM in P300 Speller[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 26(5): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张淑宁, 王福利, 何大阔, 等. 基于多最小二乘支持向量机的草酸钴粒度软测量[J]. 仪器仪表学报, 2010, 17(9): 103—106.
Zhang Shuning, Wang Fuli, He Dakuo, et al. Soft sensing pr obate oxalate particle size based on multiple LSSVM regssion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 17(9): 103—106. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨君, 李细荣. 基于炭焙—电烘焙技术的武夷岩茶烘焙机研究[J]. 宜春学院学报, 2011, 33(8): 70—73.
Yang Jun, Li Xirong. The research of wuyi rock tea drying machinery combining with charcoal drying and electric drying technology[J]. Journal of Yichun College, 2011, 33(8): 70—73. (in Chinese with English abstract)
- [19] Mann G K I, Gosine R G. Three-dimensional min-max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 10(2): 300—323.
- [20] 周国雄, 熊达清, 敬文举. 禽蛋孵化过程的混合智能控制[J]. 农业机械学报, 2008, 1(10): 62—65.
Zhou Guoxiong, Xiong Daqing, Jing Wenju. Hybrid intelligent control for incubation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 1(10): 62—65. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周国雄, 晏密英. 基于 PSO 的模糊控制及在孵化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008, 24(1): 72—74.
Zhou Guoxiong, Yan Miyong. Fuzzy control algorithm based on particle swarm optimization for incubation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 24(1): 72—74. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周国雄, 蒋辉平, 肖会芹. 孵化控制系统的专家模糊控制方法及其应用[J]. 计算机测量与控制, 2007, 24(1): 45—49.
Zhou Guoxiong, Jiang Huiping, Xiao Huiqin. Method and application of expert-fuzzy control system for incubation[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 24(1): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [23] 林荣川, 林清娇, 林河通. 铁观音茶烘焙机温度小超调模糊-PID 控制[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2011, 40(5): 474—476.
Lin Rongchuan, Lin Qingjiao, Lin Hetong. Small-overshoot control of temperature system based on fuzzy-PID for Tieguanyin tea roaster[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 40(5): 474—476. (in Chinese with English abstract)
- [24] Wang H L, Kwong S, Jin Y C. Multi-objective hierarchical genetic algorithm for interpretable fuzzy rule-based knowledge extraction[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 149(1): 149—186.
- [25] Tong Shaocheng, Ren Chang. Adaptive fuzzy daptive fuzzy decentralized control for nonlinear large-scale systems based on high-gain observer[J]. Science China: Information Sciences, 2012, 26(1): 72—76.
- [26] Lai Yanan, Dai Ye, Bai Xue. Discrete variable structural optimization based on multidirectional fuzzy genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 56—61.
- [27] 李兵, 李尚庆, 夏涛. 基于模糊 PID 控制的六安瓜片远红外烘焙机设计[J]. 农机化研究, 2011, 24(8): 150—153.
Li Bing, Li Shangqing, XiaTao. The design ofliuan guapian tea far infrared bakingmachine based on fuzzy PID controler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 24(8): 150—153. (in Chinese with English abstract)

- [28] 中华人民共和国农业部. NY/T 787—2004 茶叶感官审评通用方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [29] 刘东娜, 聂坤伦, 杜晓. 抹茶品质的感官审评与成分测定分析[J]. 食品科学, 2013, 23(5): 1—5.
Liu Dongna, Nie Kunlun, Du Xiao. Sensory evaluation and component determination analysis of matcha quality[J]. Food Science, 2013, 23(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘平, 尹军峰, 许勇泉. 典型市售水对烘青绿茶茶汤主要理化成分及品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 23(5): 5—8.
Liu Ping, Yin Junfeng, Xu Yongquan. Effect of water quality on the main composition and quality of baked green tea extracts[J]. Food Science, 2013, 23(5): 5—8. (in Chinese with English abstract)

Method of variable universe fuzzy control base on inverse-model decoupling for green tea baking

Li Lin, Zhou Guoxiong

(Department of Information and Communication Engineering,
Hunan Institute of Science and Technology, Changsha, Hunan 414006, China)

Abstract: Baking technology is the key technology of the Green Tea refining process, and it directly affects the preservation of tea time, aroma and taste. At present, there are two ways for Green Tea baking; charcoal baking and roasting. Machine baking of charcoal, the main process by manual operation, greatly rely on the experience of workers and a low degree of standardization, but the tea quality is not stable; machine baking with an electric oven for baking is widely used, but due to the lack of systematic research, the control algorithm is simple, the temperature error is higher than 5 °C, and the humidity error is greater than eight percent. Therefore, studies of one kind of advanced green tea baking process control method should be of vital significance.

The key of the baking process is precise control of temperature and humidity, however, the roasting process physics, complex chemical changes, system temperature, and humidity influence each other, forming a nonlinear coupling. At the same time, when baking process parameters are affected by environment changes, the traditional control algorithms often provide poor results. Through the analysis of the principles of machine roasted green tea baking, it is not hard see that control key processes, such as the high precision control of decoupling temperature and humidity, are important.

To solve these problems, a variable universe fuzzy control model based on the inverse-mode decoupling method was proposed. The control system consists of the inverse system decoupling compensation based on SVM, base temperature, humidity, and variable universe fuzzy algorithm for independent control of two parts. The SVM decoupling compensator, utilizing self-learning characteristics of SVM, and the reverse identification of the original system, to approximate the inverse model Green Tea baking system, connected with the original system in parallel, a pseudo linear system. The motor temperature and humidity into the subsystem are independent of each other, and then the linear system control method is used to control the baking process.

Variable universe fuzzy algorithm, according to the temperature, humidity setting value and the system detection feedback value, respectively, to achieve closed-loop on temperature, humidity independent fuzzy control; then the variable universe fuzzy algorithm, to solve system device parameters and the parameters of the sensor drift on the fixed rules of fuzzy algorithm, improve control accuracy and adaptability to environment.

Adopting this control system, the test comparison of 3 kinds of Green Tea sample, temperature control error is less than 1.4 °C, relative humidity error is only 2.8%, but with PID controller, the temperature error is 5.2 °C, the relative humidity of the error of 7.6%. The average score of sensory evaluation in this paper is 95.7, better than PID control algorithm scored an average of 85.8, the average increase of 15.2% tertiary alcohol ingredient orange flower, alpha foreseen component increased an average of 17.4%, linalool increased an average of 14.2% components. The performance and quality of experiments prove the effectiveness of this method.

Key words: fuzzy control; couplings; models; green tea baking; inverse mode; decoupling; SVM; variable region

(责任编辑: 郭海枫)