

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.008

茶叶理条机双模糊控制系统设计*

傅 杰, 赵章风*, 钟 江, 乔 欣
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对茶叶在机制理条过程中出现色泽变黄、变暗或产生焦味等问题,通过对茶叶理条工艺、温度控制、模糊算法和模糊PID控制等方面进行研究,将模糊算法与模糊PID控制技术应用到茶叶理条机控制系统之中,提出了一种基于模糊算法、模糊PID控制技术以及STM32 ARM Cortex-M3内核单片机的茶叶理条机双模糊控制系统设计。运用Matlab对传统PID控制系统与双模糊控制系统进行了计算机控制系统仿真,并在上洋机械生产的6CLZ-60型茶叶理条机上进行了两种控制系统实验。研究表明:该双模糊控制系统输出的茶叶理条加工参数理想,温度控制偏差小于1℃;茶叶理条机双模糊控制系统有效减少了制茶过程中人为因素的干扰,提高了茶叶理条品质及茶叶加工机械智能化水平。

关键词:模糊控制;模糊PID;茶叶理条机;温度控制;Matlab

中图分类号:TH69;TH39;TS272.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-0993-06

Double fuzzy control system for tea carding machine

FU Jie, ZHAO Zhang-feng, ZHONG Jiang, QIAO Xin

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the color yellow, darker or burnt problems generated in tea carding, by the analysis of tea carding technology, temperature control, fuzzy algorithm and fuzzy-PID control technology, fuzzy algorithm and fuzzy-PID control technology was applied in tea carding machine control system. A design of tea carding machine double fuzzy control system based on fuzzy algorithm, fuzzy-PID control technology, and STM32 ARM Cortex-M3 microcontroller was presented. Simulations about traditional PID control system and double fuzzy control system were made in Matlab, and also the experiments about the both systems on 6CLZ-60 tea carding machine were done. The results indicate that the parameters which output by this control system are ideal of tea carding, the temperature departure is less than 1℃. The double fuzzy control system for tea carding machine can reduce the human factors in the process of tea-making, improve the quality of tea carding and the intelligent level of the machine for tea-making.

Key words: fuzzy control; fuzzy PID; tea carding machine; temperature control; Matlab

0 引言

茶叶理条在茶叶加工工序中有着至关重要的作用,在理条的过程中,温度控制是最重要的。传统茶叶理条机的理条温度在90℃~110℃,不稳定且波动较大,导致茶叶色泽变黄、变暗或产生焦味^[1-3]。

由于理条机温度的变化并非线性,很难建立精确的数学模型^[4]。随着智能控制的发展,王小勇、李兵等^[5-6]提出了一种基于模糊算法与主副加热部件的理条机温度控制方案,并提出了基于神经网络的理条工艺优化方法。

本研究将结合模糊算法与PID算法对茶叶理条机进行理条参数输出及温度控制,建立控制系统模型并

收稿日期:2017-01-12

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B06);国家自然科学基金资助项目(31201138)

作者简介:傅 杰(1988-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事机电一体化方面的研究. E-mail:13958029530@163.com

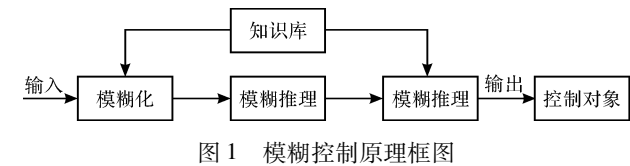
通信联系人:赵章风,男,副教授,硕士生导师. E-mail:i12fly@163.com

进行仿真,并进行试验。

1 总体控制方案设计

1.1 模糊控制原理

模糊控制原理如图 1 所示^[7-8]。



1.2 茶叶理条机工作原理

茶叶理条机主要由电动机、传动装置、计量装置、锅槽、加热装置、温度传感器以及电气控制箱组成。先由计量装置确定需理条的茶叶投送量,结合湿度等级确定具体的理条温度及时间,再由温度传感器取得锅槽实际温度和预定温度的偏差值,以提供控制器进行模糊 PID 控制计算,最后得到加热装置的控制脉冲占空比已进行温度控制。待理条时间到后自动控制茶叶出锅。

上洋机械 6CLZ-60 型理条机如图 2 所示。



图 2 上洋机械 6CLZ-60 型茶叶理条机

1.3 茶叶理条机双模糊控制方案

本研究将待理条茶叶的湿度等级和单锅理条的投叶量作为模糊控制算法的输入,其中茶叶的湿度等级为人工判定后手动输入,单锅投叶量为传感器测得。温度与理条时间为两个重要因素,故设置这两组参数为模糊算法的输出。在温度控制系统中使用模糊 PID 算法,使理条机锅槽内温度处于动态平衡状态。模糊控制算法通过 ARM CORTEX-M3 内核的微处理器得以实现。本研究通过温度传感器得到理条机锅槽内温度,并计算偏差 E 和偏差速度 E_c ,在通过模糊 PID 控制器计算出加热模块的占空比,从而控制锅槽温度。

具体控制方案如图 3 所示。

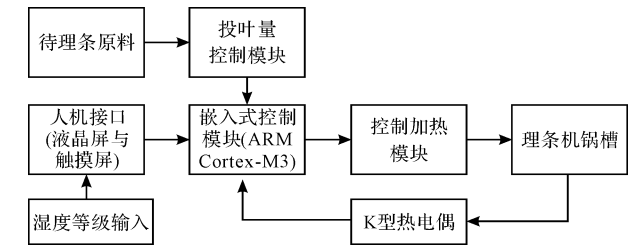


图 3 理条机控制框图

2 控制器设计

2.1 理条机模糊决策控制器设计

模糊决策控制器通过输入的待理条茶叶湿度与投叶量两个参数,通过模糊控制决策出理条工艺的温度与时间,并输出到控制器。

2.1.1 建立隶属度函数模型

本研究采用三角函数法建立茶叶湿度等级、单锅投送量、理条时间、理条温度的隶属度函数,应使用 Matlab 中的 Fuzzy 工具箱建立输入输出变量隶属度函数模型并编辑控制规则。

本研究根据专家经验将待理条的茶叶分为 5 个等级,并建立模糊子集 $\{A、B、C、D、E\}$ 。分别代表较湿、湿、一般、干、较干。论域设置为 $[0,100]$,采用三角形隶属度函数以实现待理条茶叶湿度模糊化。

通过 Matlab 建立起隶属度函数模型如图 4 所示。

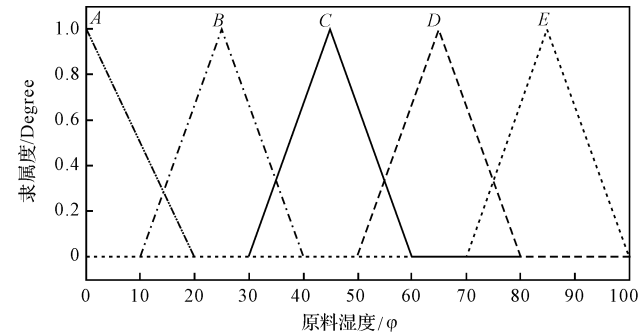


图 4 茶叶湿度隶属度函数

同时,本研究将待理条茶叶的投叶量分为 5 个等级 $\{S、MS、M、MB、B\}$,分别代表少、中少、中、中多、多。根据理条机投叶量的实际情况,论域设置为 $[1,10]$ 。同样采用三角形隶属度函数来实现投叶量的模糊化。通过 Matlab 建立起隶属度函数模型。

根据茶叶理条机实践经验,在代理条的茶叶湿度等级与投叶量不同时,理条锅槽的温度因维持在 $90\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$,且需保持锅槽内温度恒定,不能忽高忽低,理条时间应控制在 $200\text{ s} \sim 400\text{ s}$ 。因此建立理条温度模糊子集 $\{L、ML、M、MH、H\}$,即低、中低、中、中高、高。

同样在 Matlab 中建立的隶属度函数如图 5 所示。

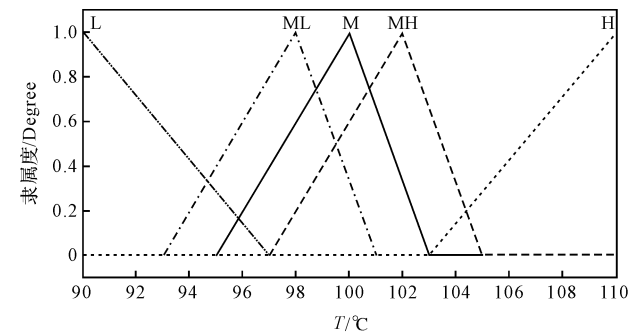


图5 理条温度隶属度函数

同样地,笔者建立理条时间的模糊子集 {S、MS、M、ME、E},亦即短、中短、中、中长、长。其在 Matlab 用三角形函数将其模糊化,得到的隶属度函数如图 6 所示^[9]。

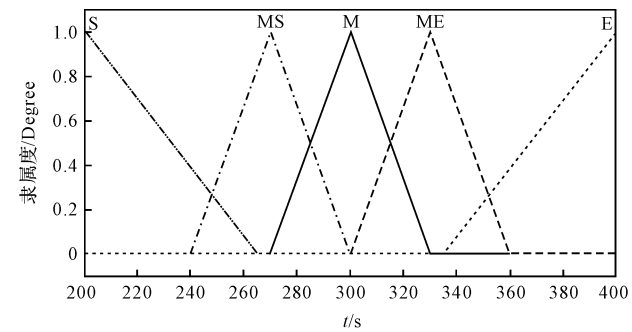


图6 理条时间隶属度函数

2.1.2 建立模糊控制规则

根据茶叶理条经验,建立模糊规则控制表如表 1 所示(表中输出量为理条温度/理条时间)。

表1 理条温度与时间模糊控制规则表

茶叶 投叶量	湿度等级				
	A	B	C	D	E
S	M/M	ML/MS	ML/MS	L/S	L/S
MS	M/M	M/M	M/M	ML/MS	L/S
M	MH/ME	MH/ME	M/M	ML/MS	ML/MS
MB	H/E	MH/ME	MH/ME	M/M	M/M
B	H/E	H/M	MH/ME	MH/ME	M/M

2.1.3 模糊推理

这里只分析理条温度的推理过程,理条时间的推理过程和理条温度是一样的,只是各自的隶属度函数不同。根据模糊控制规则求得模糊关系 $\bar{R}$ 及其控制量 $\bar{T}$,本研究使用马丹尼模糊控制模型,即马丹尼推理法。

若湿度等级和投叶量分别取 $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$,设:

$$D_k = \bar{A}_i + \bar{B}_j \tag{1}$$

式中: $i,j = 1,2,\cdots,25;k = 1,2,\cdots,25$ 。

根据模糊关系 $\bar{R}$ 、输入 $\bar{A}$ 以及 $\bar{B}$,求得控制量 $\bar{T}$:

$$\bar{T} = (\bar{A} \times \bar{B}) \circ \bar{R} \tag{2}$$

有模糊推理所得到的模糊输出值 $\bar{T}$ 是输出论域上的模糊子集,亦或说隶属度函数,故要将其转化为精确量 T ,及理条温度具体值才能应用到控制系统中。

2.1.4 解模糊

模糊控制系统最终输出到控制执行机构依然是精确量,其过程为解模糊。常用的解模糊算法有最大隶属度法、中位数法和加权平均法^[10],该设计中采用加权平均解模糊法,其算法为:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_{u1}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{u1}(x_i)} \tag{3}$$

式中: x_0 —加权平均求得判决结果; x_i —模糊集 U_1 中的元素。

笔者得出具体理条时间与理条温度输出效果如图 7、图 8 所示。

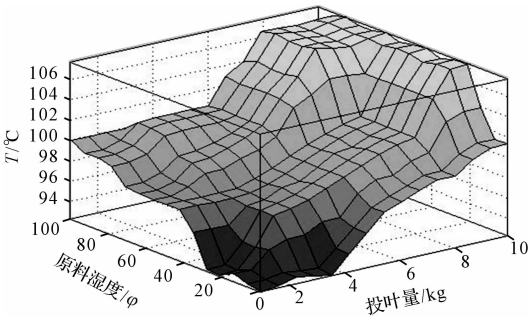


图7 理条温度输出结果

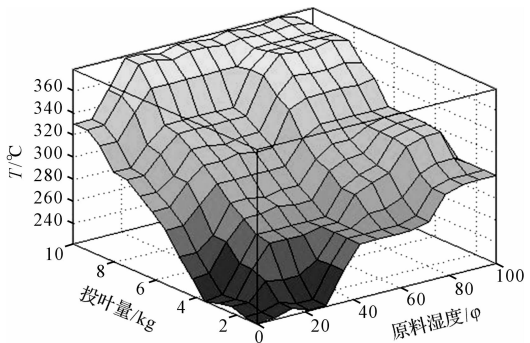


图8 理条时间输出结果

2.2 理条机温度模糊 PID 控制器设计

本研究的温度模糊 PID 控制主要包含参数模糊化、模糊规则建立、解模糊、PID 控制等几个重要环节。温度模糊 PID 控制是以温度偏差 E 以及温度偏差变化率 E_c 作为控制的输入,并根据模糊规则进行模糊推理,最后再进行解模糊运算已得到精确控制量,输入到控制执行机构。

2.2.1 参数模糊化

本研究根据使用传统 PID 温度控制算法在上洋机

械 6CLZ-60 型茶叶理条机上进行测试的结果,得出其温度控制在设定值 $[-5, +5]$ 范围内最为重要,故在这个偏差区间内加入模糊算法以修正 PID 参数。同样根据测试结果,得出其偏差变化速度在 $[-3, +3]$ 范围内时需要 PID 参数进行动态调整。

温度偏差 E 、变化率 E_c 以及 PID 控制器的 3 个参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 均设置为由 7 个语言变量组成 {负大 NB, 负中 NM, 负小 NS, 零 ZO, 正小 PS, 正中 PM, 正大 PB}。这里模糊 PID 的 3 个参数的修正量论域我们选择为 $[-3, +3]$,在解模糊得以精确化参数后再乘以各自的比例系数 G_{kp} 、 G_{ki} 、 G_{kd} ,得到最终的 PID 参数修正量。

考虑到论域的覆盖程度、控制系统的灵敏性和鲁棒性,各模糊子集的隶属度函数均采用三角形隶属度函数和 S 形隶属度函数相结合。这里给出输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数,如图 9 所示。

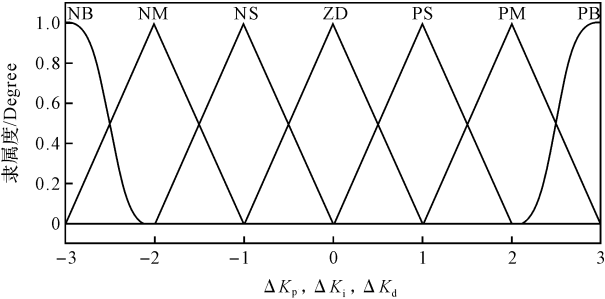


图 9 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 隶属度函数

2.2.2 建立模糊控制规则

模糊 PID 算法是在传统 PID 算法的基础上,结合模糊控制,原理如图 10 所示。

$$u(n) = K_p E(n) + K_i \sum E(n) + K_d E_c(n) \quad (4)$$

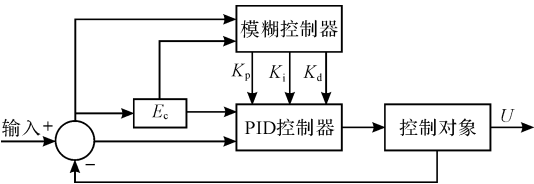


图 10 模糊 PID 控制框图

这里根据实际测试得到的经验,模糊控制规则的设计原则是:当出现较大偏差的时候,控制量应尽快使偏差减小;而当偏差较小时,控制量在消除偏差的同时,应尽量防止出现较大超调。

模糊控制规则一般是基于手动控制策略,具体通过设备使用者或开发人员对其观测再结合实际使用经验,从系统的稳定性、超调量、响应速度和稳态偏差等指标考虑,建立适合其控制模糊规则表。 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则表,如表 2 所示。

表 2 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊控制规则表

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

2.2.3 温度模糊 PID 控制输出效果

同样采用马丹尼模糊推理法与加权平均解模糊法,得出 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制决策表,如表 3 所示。

表 3 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊决策表

E	E_c						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-5	0.000	1.000	1.999	2.739	2.739	2.739	2.739
-3.33	-1.003	-0.003	0.997	1.997	2.734	2.739	2.739
-1.67	-2.013	-0.998	0.003	1.003	2.000	2.739	2.739
0	2.739	2.000	1.000	0	1.000	2.000	2.740
1.67	2.740	2.000	1.003	0.003	0.998	1.989	2.707
3.33	2.735	2.735	1.997	0.998	0.003	-0.990	-2.009
5	2.740	2.740	2.740	2.000	1.000	1.000	0.000

进行 PID 控制时,笔者根据测得的 E 和 E_c 进行查表,以得出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的精确值,分别乘以比系数 G_{kp} 、 G_{ki} 、 G_{kd} ,得出最后 PID 参数修正量,并代入 PID 计算中:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \times G_{kp} \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \times G_{ki} \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \times G_{kd} \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} —通过式凑法得到的 PID 控制参数。

3 控制器仿真及结果分析

本研究采用 Matlab 中的 Simulink 建立模糊 PID 控制器以及标准的 PID 控制器模型来进行计算机仿真验证。由于理条温度与时间是决策输出且已经有效果图,这里只做温度控制仿真。本研究通过传统 PID 与模糊 PID 这两种不同算法的仿真来进行温度控制效果对比,系统结构如图 11 所示。

本研究中系统为一介惯性系统^[11-14],通过阶跃响应法测得其传递函数为 $2.4e^{-5s}/50s + 1$,使用模糊 PID 算法和 PID 算法分别对其进行仿真。

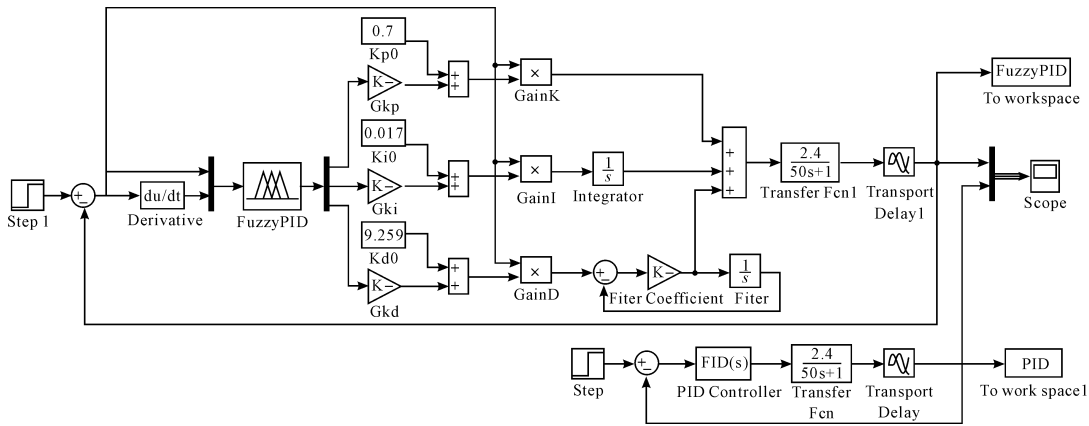


图 11 模糊 PID 及标准 PID 系统结构图

从控制系统稳定性、响应速度、超调量及稳态特性、精度等各方面考虑,参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的作用如下:

(1)比例系数 K_p 的作用为提高系统的相应速度和系统调节精度, K_p 越大,系统响应速度便越快,且调节精度也越高,但后果是导致系统稳定性下降,而若 K_p 取值过小则会使系统的响应速度以及精度变得较低,从而延长调节时间,影响系统静态动态特性;

(2)积分系数 K_i 的作用为消除系统稳态误差,加大 K_i 能加快系统静态误差的消除,但若 K_i 取得过大,则会较快出现积分项饱和现象,从而同样引起系统较大的超调, K_i 过小则会使系统的静态误差较难消除,影响系统的精度;

(3)微分控制的作用是改善系统的动态特性,在系统响应过程中起到抑制偏差变化,对偏差进行提前预报,但如若其系数 K_d 取得过大,则会使响应过程提前制动,导致调节时间延长,并会同时降低系统的抗干扰能力。

根据上述原则,使用凑法来确定 PID 控制的参数。即先将 K_i 、 K_d 设置为零,单独设置 K_p 的参数。之后设置 K_i 的参数,最后确定 K_d 的参数。

其中,参数设置如下: $K_{p0} = 0.7$, $K_{i0} = 0.017$, $K_{d0} = -9.259$;模糊 PID 算法中比例系数为 $G_{kp} = 0.15$, $G_{ki} = 0.0015$, $G_{kd} = 1.5$ 。系统阶跃响应仿真结果如图 12 所示。

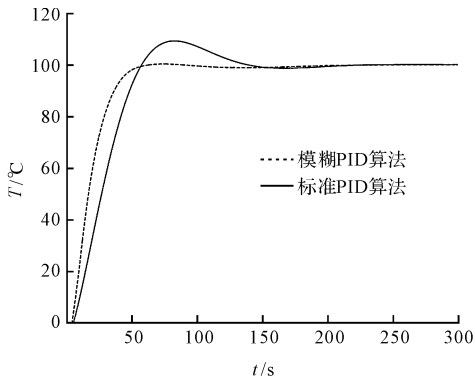


图 12 系统阶跃响应仿真结果

标准 PID 控制算法超调量 $\sigma \approx 9.1\%$,调节时间 $t_s \approx 130\text{ s}$,稳态误差 $e_s = 0$;模糊 PID 控制算法超调量 $\sigma \approx 2.2\%$,调节时间 $t_s \approx 130$,稳态误差 $e_s = 0$ 。

可以看出,模糊 PID 算法较标准 PID 算法优势明显,能显著减小系统的超调与调节时间。

4 理条机控制实验

4.1 模糊 PID 温度控制实验

本研究基于 ARM Cortex-M3 内核微处理器、K 型热电偶、LM358 精密运放以及光、磁隔离等技术完成了在上洋 6CLZ-60 型理条机上的两种控制算法的实验。并通过 RS232 接口,将温度数据传送给计算机做记录,控制温度均设置为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

得到两种算法的实际效果对比曲线,分别如图 (13~14) 所示。

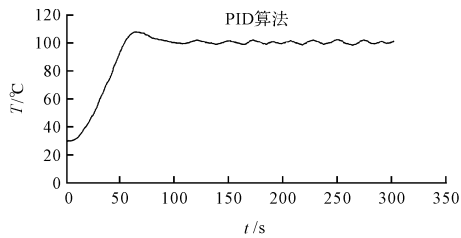


图 13 PID 算法理条机控制实验曲线

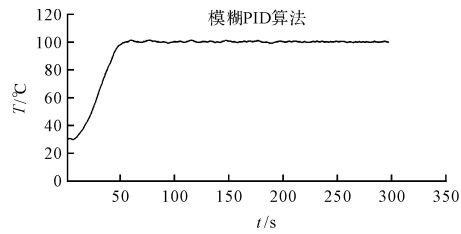


图 14 模糊 PID 算法理条机控制实验曲线

从实验看出模糊 PID 算法较之 PID 算法在超调与相应时间上都有优势。模糊 PID 控制算法控制温度偏差在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,完全符合理条工艺要求。

4.2 双模糊茶叶理条机控制系统实验

本研究在确认系统的温度控制较传统单一 PID 控制有较大改进,且偏差控制在 1 ℃ 以后,进行整体茶叶理条实验。

本研究选取相同批次茶叶,投叶量均设置为 2 kg,分别使用传统理条机控制系统于双模糊智能控制系统进行茶叶理条,进行相关茶叶的评审及碎茶率测量。根据 SB/T10157-1993(茶叶感官评审方法)相关标准进行人工评审,品质评审因子权重分配如表 4 所示。

表 4 绿茶品质评审因子权重分配表

项目	细分项目	权重
外观	形状	1.5
	色泽	0.5
	整碎	1.0
	净度	1.0
内质	香气	1.5
	滋味	2.0
	汤色	1.0
	叶底	1.5

两种控制系统先后在同一台理条机使用,并在相同环境条件下进行茶叶理条。其中传统控制系统下,工人将理条温度及时间分别设为 95 ℃ 和 250 s;模糊控制系统下,人工判定后输入茶叶湿度等级为中,系统自动计算出理条温度为 93 ℃,理条时间为 224 s。两次理条完成后的茶叶均在完成静态式烘干后,测试其碎茶率。其中碎茶率为:

$$SC = \frac{M_1}{M} \times 100\%$$
 (6)

式中:SC—碎茶率,%;M₁—碎茶质量,g;M—试样适量,g。得分计算公式为:

$$S = \sum_i^8 A_1 a_1$$
 (7)

式中:S—评审分数;A₁—各评审因子得分;a₁—各评审因子权重。

最后评审结果及碎茶率结果如表 5 所示。

表 5 评审及碎茶率结果

控制方式	评审得分	碎茶率/(%)
传统控制系统	904.5	10.8
双模糊控制系统	923.7	5.9

5 结束语

本研究结合茶叶理条工艺的要求,利用 Matlab 软件进行模糊 PID 算法的控制系统仿真,最后通过微控制器与传感器技术实现茶叶理条机的智能控制系统设计并进行了验证,得到如下结论:

(1)相较传统 PID 温度控制模式,模糊 PID 智能控制能更好的达到控制效果;

(2)使用模糊决策来得到理条工艺所需的温度与时间参数,可以有效避免人为因素对理条效果的影响;

(3)将两种模糊控制结合使用有效减小了理条碎茶率并调高了理条后茶叶的品质。

参考文献(References):

[1] 司辉清,庞晓莉,刘建军,等. 机制形名优绿茶工艺研究[J]. 西南农业大学学报,2003,25(4):370-373.

[2] 钟映富,周正科,胡翔,等. 振动理条对针形名茶品质的影响[J]. 中国茶叶,2002,24(1):32-33.

[3] 周智修,段文华,吴海燕,等. 我国名优茶发展现状与趋势[J]. 茶叶科学,2013,33(2):171-178.

[4] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.

[5] 王小勇,李兵,曾晨,等. 基于模糊算的茶叶理条机温度控制设计[J]. 茶叶科学,2015,35(4):363-369.

[6] 王小勇,李兵,曾晨,等. 茶叶理条工艺的神经网络优化[J]. 食品与机械,2016,32(1):103-105.

[7] MOORE C G, HARRIS C J. Indireet adptive fuzzy control[J]. Journal of control,1992,56(2):441-448.

[8] LIN Chun-fu, WANG Sheng-de. Fuzzy support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002,13(2):464-471

[9] 王正林,王胜开. Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2008.

[10] 卢佩,刘效勇. 基于 LabVIEW 的温室大棚、湿度解模糊控制检测系统设计与实现[J]. 山东农业大学学报, 2012,43(1):124-128.

[11] ZHI Dong, ZHU Xin-jian, CAO Guang-yi. Temperature modeling of DMFC based on RBFNN and neural fuzzy control study[J]. Journal of System Simulation (S1004-713X), 2007,19(1):126-129,137.

[12] 屈毅,宁铎,赖展翔,等. 基于模糊 PID 控制的温度控制系统[J]. 计算机应用,2009,29(7):1996-1999.

[13] 宋晓华. 基于 PID 与模糊控制的切削加工过程双模控制[J]. 轻工机械,2015,33(2):61-64.

[14] 张晓娟. 基于模糊 PID 的除氧器温度控制系统的设计与 设计[D]. 西安:西安理工大学自动化与信息工程学院, 2009.

[编辑:李辉]

本文引用格式: