

基于模糊神经网络 PID 控制的花茶烘焙温控系统设计

Design of tea baking temperature control system based on fuzzy neural network PID control

陈 星

CHEN Xing

(南京信息职业技术学院, 江苏 南京 210023)

(Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

摘要:针对花茶烘焙时对温度的精细化要求,提出由模糊控制、神经网络和 PID 组合算法构成的控制系统,实现对温、湿度的可靠控制,达到对鲜花快速去湿干燥的目的。系统将温度和湿度的误差 e 和误差率 ec 作为输入变量进行模糊化处理,确立隶属度函数,通过模糊推理和解模糊化生成输出量,为 PID 控制系统提供优化的调控因子 ΔK ,精准控制执行单元。系统采用 RBP 神经网络算法对模糊控制过程进行精细实时变量调控,以 Delta(δ)函数和梯度下降算法为学习规则调整网络加权系数 w 、中心向量 c_{ij} 和基宽向量 b_{ij} 。系统利用 Matlab 软件进行数据仿真,对比传统 PID 控制和模糊控制,验证模糊神经网络 PID 组合控制的优越性,数据分析表明组合控制系统对温度的响应速度和数据的精确性都明显改善,扰动补偿和抗干扰能力有效提高,系统鲁棒性更好。

关键词:花茶;烘焙;神经网络;模糊控制;PID;温控系统

Abstract: Aiming at the refined requirements of temperature in the process of scented tea baking, a control system composed of fuzzy control, neural network and PID algorithm was proposed to realize the reliable control of temperature and humidity and to achieve the purpose of rapid dehumidification and drying of flowers. The system taken the temperature and humidity error e and error rate ec as input variables for fuzzy processing, established membership function, through fuzzy reasoning and fuzzy production into the output, for PID control system to provide optimal regulatory factor ΔK , accurate control of the executive unit. The system adopts RBP neural network algorithm to fine-tune the real-time variables in the fuzzy control process, and USES Delta(δ) function and gradient descent algorithm to adjust

the network weighting coefficient w , central vector c_{ij} and base-width vector b_{ij} as learning rules. Data simulation system by using Matlab software, compare the traditional PID control and fuzzy control, and verify the superiority of the combination of fuzzy neural network PID control, the data analysis shows that the combination of temperature control system response speed and the accuracy of the data are obviously improved, the disturbance compensation and improve anti-jamming capability, and it has better robustness.

Keywords: scented tea; baking; neural network; fuzzy control; PID; temperature control system

随着人们生活水平的不断提高,花茶逐渐成为生活中常见的饮品之一,高品质的花茶更是市场娇儿。影响花茶的品质除了花苞自身的优良之外,还有制茶工艺^[1]。制茶工艺通常为合理烘干去湿过程,其间重要的影响参数为温、湿度,温、湿度的高低和作用时间直接影响花茶制作后的元素保有量和花苞造型,利用控制技术完成最佳炒茶环境的调控设计一款智能炒茶温控系统具有现实意义。温控系统具有时滞性、大耦合、非线性的特点,无法建立精确数学模型^[2]。传统的 PID 控制系统结构简单,实现方便,但无法实现精确控制。模糊控制依靠构建输入输出变量模糊子集和隶属函数关系,依据模糊规则和推理,实现精准控制^[3]。神经网络具有自学习、实时性、自适应性强的特点,可弥补模糊控制中依靠专家系统制定的模糊规则局限性的缺点,实现对控制参数的实时精确控制^[4]。

为实现对炒茶机中温控系统的精确调控,从而炒制出品质优异的花茶。研究拟提出基于模糊控制+神经网络+PID 控制的组合控制系统,经过 Matlab 软件进行模拟仿真和实际应用测试,并对组合系统和单纯 PID 控制

作者简介:陈星(1977—),男,南京信息职业技术学院讲师,工程硕士。E-mail: 1025195472@qq.com

收稿日期:2020-06-01

系统的控制结果进行对比分析,验证组合控制系统的调控效果。

1 花茶制作工艺分析

制茶的目的是快速将新鲜花朵进行去湿干燥,生成最多有益元素。传统花茶制作工艺为热风干燥、阴凉干燥和硫磺熏蒸,效率低下、品质差、副作用大,已逐渐被淘汰。现代制茶工艺为微波干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥及组合干燥等形式^[6]。在花茶制作过程中通常需要进行高温快速杀青(80℃以上,10 min以内),低中恒温中长时间发酵或回潮(30℃左右,10~15 h),中温长时干燥(50~80℃,15 h以上),过程中湿度由高到低随时长逐次降低(80% RH以上—60% RH—30% RH—18% RH以下)^[6]。不同的花朵和茶品采取的工艺也不相同,制茶过程中需要调控的主要因素为温度、湿度和时间,三者之间的协调关系直接影响花茶的品质。制茶去湿干燥方法是在时间作用下改变温度和通风,温湿度之间具有较强的耦合性,在风量变化情况下时刻变化的湿度数值直接影响温控效果,如何快速地对时刻变化环境的高效响应,将是高精度温控的关键。

2 模糊神经网络 PID 控制器设计

2.1 控制原理

控制器以温度和湿度两个参数实测量与设置量的误差 e 和误差率 ec 作为输入变量,通过模糊控制和神经网络组合运算,输出实时整定的 PID 调控因子变化量 ΔK (ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D),再将 PID 调控因子初始 K_0 与 ΔK 之和作为对 PID 输入变量 $e(t)$ 的调控因子 $K(t)$ 进行运算输出控制量 $u(t)$,对执行单元进行控制,实现对温控系统实时调控的目的^[7]。控制结构如图 1 所示。

调控因子公式为:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (1)$$

式中:

K ——调控因子;

K_0 ——调控因子初始值;

ΔK ——调控因子变化值;

P ——比例关系;

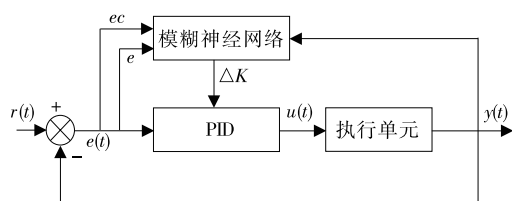


图 1 模糊神经网络 PID 控制结构

Figure 1 Fuzzy neural network PID control structure

I ——积分时间, s;

D ——微分时间, s。

PID 控制基本算法,公式为:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

式中:

$u(t)$ ——控制器输出量;

K_P ——控制器比例因子;

K_I ——控制器积分因子;

K_D ——控制器微分因子。

2.2 模糊控制

将温度(T)和湿度(H)各自的误差 e 及误差率 ec 作为模糊控制的输入变量,即温度 e_T 、 ec_T 和湿度 e_H 、 ec_H 。定义输入变量的基本论域为温度 $[-15, 15]$,湿度 $[-30, 30]$,模糊论域为 $[-6, 6]$,量化因子为 0.4, 0.2。输入变量模糊子集,设定 7 个等级,即 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB,分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大^[8]。采用高斯函数为隶属度函数,如图 2 所示。

模糊控制将 PID 调控因子变化量 ΔK (ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D) 作为输出变量,基本论域为 $[-10, 10]$,模糊论域为 ΔK_P $[-5, 5]$ 、 ΔK_I $[-0.5, 0.5]$ 、 ΔK_D $[-0.1, 0.1]$,量化因子为 0.5, 0.05, 0.01,模糊子集设立 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 7 个等级,采用高斯函数为隶属度函数,如图 3 所示。

依据模糊子集的定义等级和输入变量数,确定模糊规则。模糊规则定义语句为:If e_T is A and ec_T is A and e_H is A and ec_H is A, then ΔK_P is B and ΔK_I is B and ΔK_D is B。A、B 分别为输入、输出的隶属函数^[9]。部分模糊规则如表 1 所示。

模糊控制依据模糊规则进行推理,生成输出变量模糊子集,经过解模糊化处理后输出控制量 ΔK (ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D)。

2.3 模糊神经网络结构

神经网络算法是为了在模糊控制过程中实现快速收敛和控制精度逼近理想状态^[10]。系统以 RBF 神经网络算法对输入输出变量构成四输入 (e_T 、 ec_T 、 e_H 、 ec_H) 三输出 (ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D) 结构,共有 4 层,即输入层、模糊化层、模糊推理层、输出层,网络结构如图 4 所示。

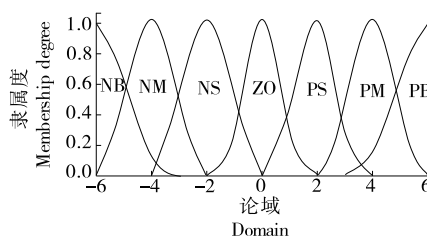


图 2 输入变量隶属度函数

Figure 2 Membership function of input variable

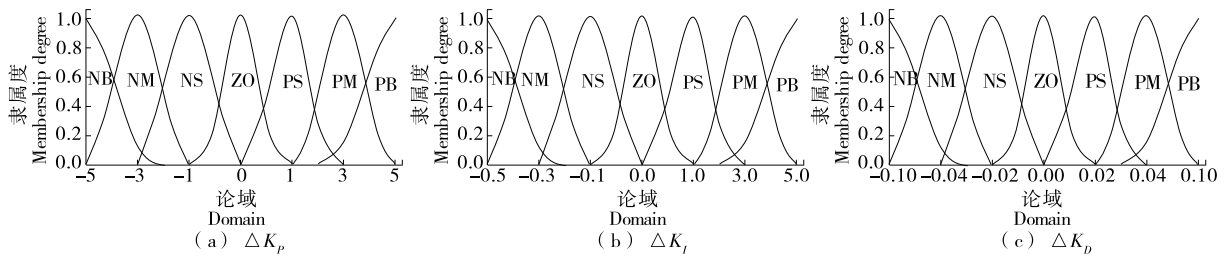


图3 输出变量隶属度函数

Figure 3 Output variable membership function

表1 部分模糊规则表

Table 1 Partial fuzzy rule table

控制器输入				控制器输出		
e_T	ec_T	e_H	ec_H	ΔK_P	ΔK_I	ΔK_D
NM	NB	NS	ZO	PM	NM	NM
NM	NM	NB	NS	PM	NS	NB
NB	PS	PB	NS	PB	NM	NS
NS	PM	PM	NM	PS	NB	NS
NM	NB	NM	PS	PM	NM	NM
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
PS	NM	PS	ZO	ZO	NS	NS

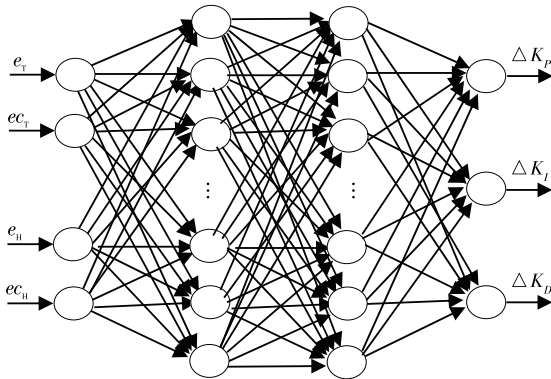


图4 神经网络结构图

Figure 4 Neural network structure diagram

(1) 输入层:该层将变换后的4个输入量导入网络中,传递给下一层,节点个数为输入变量个数即4个。每个节点的输入输出关系为: $x_1 = e_T, x_2 = ec_T, x_3 = e_H, x_4 = ec_H$ 。

$$f_1(i) = X = [x_1, x_2, x_3, x_4], \quad (3)$$

式中:

$f_1(i)$ ——输入层函数;

i ——对应输入变量,即1,2,3,4。

(2) 模糊化层:该层将输入变量转变成模糊矢量,构建模糊子集,确立隶属度函数。计算公式为:

$$f_2(i, j) = \exp\left\{-\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{(b_{ij})^2}\right\}, \quad (4)$$

式中:

$f_2(i, j)$ ——模糊量隶属函数;

i ——输入变量,即1,2,3,4;

j ——模糊子集数,1,2,3, ..., n ;

c_{ij} ——隶属函数中间值;

b_{ij} ——隶属函数的基宽。

(3) 模糊推理层:该层确立模糊规则进行模糊运算,每个节点对应一条模糊规则,节点的输出等于所有输入量的乘积^[11]。运算公式为:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j), \quad (5)$$

$$N = \prod_{i=1}^n N_i, \quad (6)$$

式中:

$f_3(j)$ ——推理层函数;

N_i ——第 i 个输入模糊分隔数,即输入变量模糊子集定义的等级数。

(4) 模糊输出层:该层将模糊推理的输出模糊量转化为清晰量,生成 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 控制量,运算公式为:

$$f_4(j) = f_3 \times w = \sum_{j=1}^N f_3(j) \times w(i, j), \quad (7)$$

式中:

$f_4(j)$ ——模糊输出层函数;

w ——推理层向输出层转换权值。

2.4 神经网络算法

系统以 Delta(δ) 函数确立学习规则进行参量调整,使用梯度下降法来实现对网络训练的调控,经过若干次的学习训练,让输出更逼近真实理想值^[12]。依据系统调控特点目标函数为:

$$E_{(k)} = \frac{1}{2} [r_{(k)} - y_{(k)}]^2, \quad (8)$$

式中:

$E_{(t)}$ ——输出层性能目标函数;

$r_{(t)}$ ——每一次迭代的理想输出;

$y_{(t)}$ ——每一次迭代的实际输出;

t ——迭代步骤。

系统加权调整算法公式:

$$\Delta w_j(k) = -\eta \frac{\partial E_{(K)}}{\partial w_j} = -\eta [r_{(k)} - y_{(k)}]$$

$$\frac{\partial y}{\partial \Delta u} \times \frac{\partial \Delta u}{\partial f_4} \times \frac{\partial f_4}{\partial w_j}, \quad (9)$$

式中:

$w_j(t)$ ——输出层的加权系数;

η ——学习速率。

模糊化层隶属函数的中间值和基宽学习算法公式:

$$\Delta b_{ij} = \eta \frac{\partial E_{CT}}{\partial b_{ij}} + \alpha \Delta b_{ij}, \quad (10)$$

$$b_{ij}(k) = b_{ij}(k-1) + \Delta b_{ij}(k) + \alpha [b_{ij}(k-1) - b_{ij}(k-2)], \quad (11)$$

$$\Delta c_{ij} = \eta \frac{\partial E_{CT}}{\partial c_{ij}} + \alpha \Delta c_{ij}, \quad (12)$$

$$c_{ij}(k) = c_{ij}(k-1) + \Delta c_{ij}(k) + \alpha [c_{ij}(k-1) - c_{ij}(k-2)], \quad (13)$$

式中:

t ——迭代步骤;

α ——学习动量因子。

3 温控系统控制器仿真与分析

针对不同温控系统控制器在花茶制作过程中对温、湿度变化的响应状态,进行软件仿真分析,测试控制器的调控效果。基于温控系统的特点,其传递函数的数学模型设定为^[13]:

$$G_{CS} = k \frac{e^{-\tau s}}{T_s + 1}, \quad (14)$$

式中:

k ——放大倍数,取 0.85;

τ ——滞后时间,取 8 s;

T ——时间常数,取 180 s。

3.1 搭建模拟仿真系统

采用 Matlab 软件对花茶烘干机温控系统的控制器进行数据仿真,分别建立传统 PID 控制、模糊控制和模糊神经网络 PID 控制模型,进行数据对比分析^[14],验证各自的控制性能。PID 控制依据经验和试验选取调整因子为 $K_p=8.8$, $K_I=0.044$, $K_D=440$ 。使用 Matlab 软件中 Simulink 工具箱包含的函数构建模糊控制和模糊神经网络 PID 控制模型^[15],学习算法中 $\eta=0.2$, $\alpha=0.02$ 。仿真系统设置采样周期为 5 s,最大训练次数为 500 次,调节时间为 0.001 s,仿真时间 3 600 s。其控制器仿真框图如图 5、6 所示。

3.2 模拟仿真数据分析

仿真数据(仿真结果如图 7 所示)分析:

(1) 传统 PID 控制:在前 500 s 内数据从初始达到最高峰值,超调量达到 48%,500~1 300 s 时调整量在 [22%, -9%] 之间震荡调整,波动明显,1 300~2 600 s 时小范围波动调整,之后趋于平稳,这种控制模式对参数的调整时间节长、波动大。

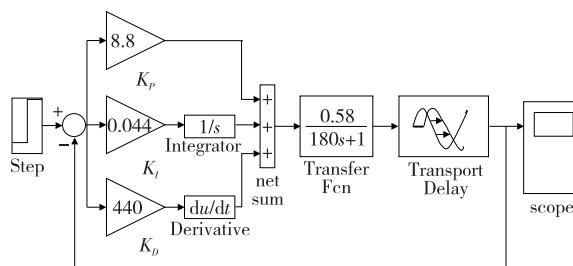


图 5 传统 PID 控制器的仿真框图

Figure 5 Simulation block diagram of the traditional PID controller

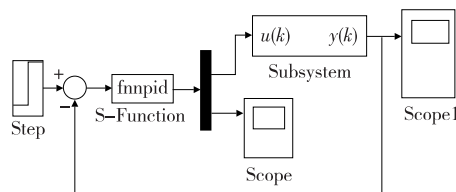


图 6 模糊神经网络 PID 控制器仿真框图

Figure 6 Fuzzy neural network PID controller simulation block diagram

(2) 模糊控制:在前 800 s 内数据从初始达到最高值,超调量达到 17%,800~1 600 s 时数据逐渐调整接近目标量,之后数据在目标量附近平稳调控,这种模式调整量波动较小,但调整时间较长。

(3) 模糊神经网络 PID 控制:在前 500 s 内达到峰值,最高超调量在 5%,500~800 s 时数据在目标量附近小量波动,之后数据进入稳定平稳运行状态,这种模式调整量波动小,且调整时间短。

通过以上 3 种模式的仿真结果分析,模糊神经网络 PID 的控制模式体现出调整迅速,运行平稳,波动小的特点,展示出该种控制模式收敛速度快,调整精度高的优势。

系统在调控平稳期 2 800 s 处,加入 10% 的扰动来检测 3 种控制模式的抗干扰及快速反应能力,仿真结果如图 8 所示。

扰动仿真结果分析:传统 PID 控制在 300 s 内实现平

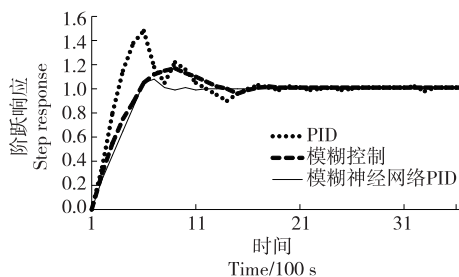


图 7 3 种控制模式仿真结果单位阶跃响应曲线

Figure 7 Unit step response curves of simulation results of three control modes

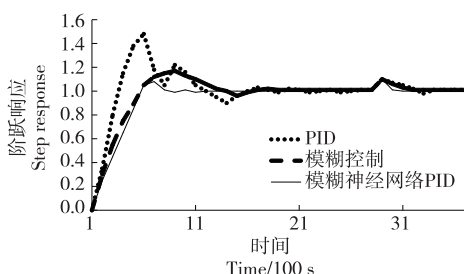


图8 加入扰动后仿真结果单位阶跃响应曲线

Figure 8 Unit step response curve of simulation results after perturbation

稳调整且有负值波动,模糊控制在 100 s 内实现调整平稳,模糊神经网络 PID 控制在 20 s 内实现平稳,从对比结果看模糊神经网络 PID 控制模式的抗扰动能力强,扰动补偿速度快,其系统鲁棒性更好。

4 菊花(胎菊)茶制作温控系统验证

4.1 温控系统组成及控制流程

系统以西安圣达 SD-30H MV-6X(30 kW)的微波烘干机为载体,分别以传统 PID 和模糊神经网络 PID 两种控制器对菊花(胎菊)茶制作过程进行温、湿度调控测试,验证其性能。

微波式烘干机,由微机、数据采集单元(传感器)、STM32 系列单片机构成控制系统,由可调节加热器(含功率调节器)、微波器(含变频器)、鼓风机、排气扇、加湿器、计时器(含开关)构成控制执行单元,由物品摆放箱、柜体、支撑架构成机体结构。控制系统结构如图 9 所示。

烘干机控制流程(如图 10 所示):开机初始化,输入控制参数(温度、湿度、时间)写入系统,传感器检测数据经过处理(滤波、放大、数模转换)后输入控制器,控制器运算生成控制指令,指挥各执行单元动作,其间传感器实时检测数据反馈至控制器,对控制器算法进行优化,程序结束完成控制流程。

4.2 制茶工艺流程

制茶工艺流程及参数要求:

鲜花清洗杀菌→杀青[温度(80 ± 2)℃,时间 500 s,湿度无要求]→发酵[温度(30 ± 2)℃,时间 18 000 s,湿度 $>50\%$ RH]→烘干[温度(50 ± 2)℃,时间 20 000 s,湿

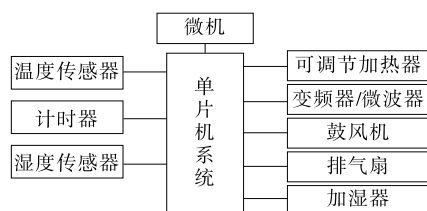


图9 微波烘干机控制系统结构

Figure 9 Control system structure of microwave dryer

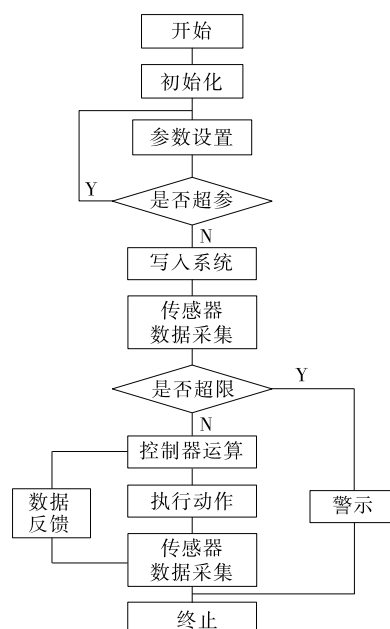


图10 烘干机控制流程

Figure 10 Control flow of dryer

度降至 15% RH 以下]→回潮(自然状态温、湿度,时间 7 200 s)→风干(自然状态温度,湿度降至 18% RH 以下)→装盒储存

控制器在各道工序中的控制过程:

(1) 杀青:开机初始化,开启排气扇和微波器(变频到预设值),检测温度,判定温度与预设温度(80°C)的关系,通过改变微波器的变频数值和排气扇开关状态,调节温度在预设值(80 ± 2)℃,开启计时器运行 500 s 后,停止微波器、排气扇、计时器,完成杀青。控制过程如图 11 所示。

(2) 发酵:杀青工序后,检测湿度,通过开关加湿器,使湿度达到大于预设值(50% RH)的要求,检测温度,判断温度与预设温度(30°C)的关系,改变鼓风机和排气扇、加热器的开关状态,调节温度在预设值[$(30 \pm 2)^\circ\text{C}$]之间,开启计时器运行 18 000 s,停止鼓风机和排气扇、计时器,完成发酵工序。控制过程如图 12 所示。

(3) 烘干:发酵工序后,检测湿度,如湿度小于预设值(15% RH)烘干结束,否则开启加热器(功率至预设值)、鼓风机和排气扇,检测温度,判断温度与预设温度(50°C)的关系,通过改变加热器的功率大小,调节温度在预设值[$(50 \pm 2)^\circ\text{C}$]之间,开启计时器运行 20 000 s,停止鼓风机和排气扇、计时器、加热器,完成烘干工序。控制过程如图 13 所示。

(4) 回潮:烘干工序后,自然状态下(不调节温、湿度),开启计时器运行 7 200 s 后,关闭计时器,完成回潮工序。控制过程如图 14 所示。

(5) 风干:回潮工序后,检测湿度,判断湿度与预设值

(18% RH)的关系,通过改变鼓风机和排气扇开关状态,使湿度达到小于预设值(18% RH),完成风干工序。控制过程如图 15 所示。

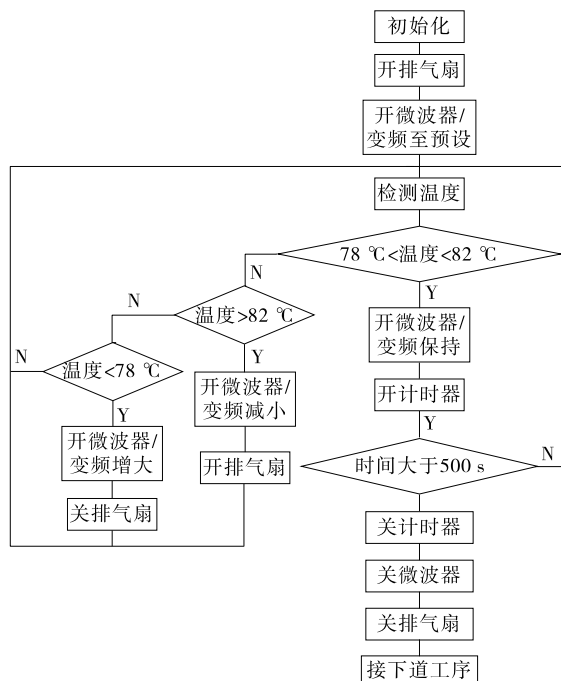


图 11 杀青控制过程

Figure 11 Completion control process

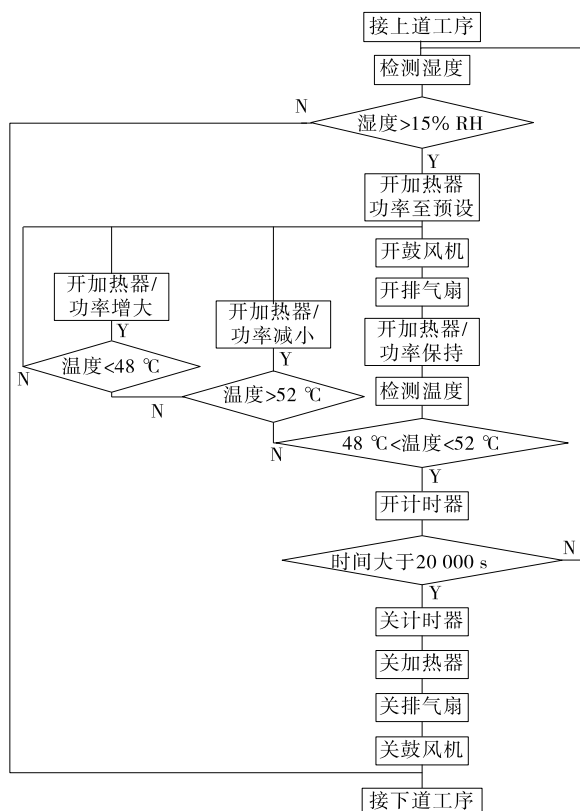


图 13 烘干控制过程

Figure 13 Drying control process

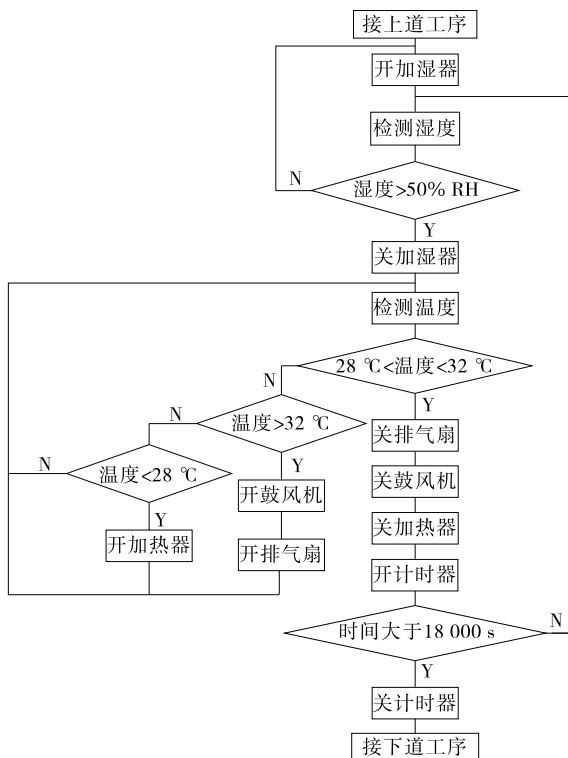


图 12 发酵控制过程

Figure 12 Fermentation process control

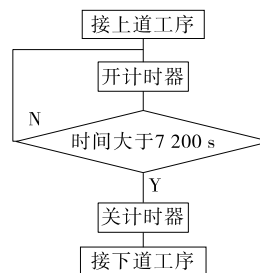


图 14 回潮控制过程

Figure 14 Moisture regain control process

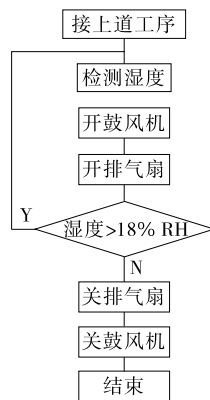


图 15 风干控制过程

Figure 15 Air drying control process

4.3 制茶温控系统验证分析

制茶过程中,设备外环境对温控系统的调控效果影响较小,视作常量处理。由于回潮和风干对温度没有要求,测试只对杀青、发酵、烘干 3 个工序结果进行比较。初始环境:温度 25℃,湿度 35% RH。

验证结果(如图 16 所示)分析:传统 PID 控制器对温度调控偏差在 $\pm 5^\circ\text{C}$,常常超出设定允许变化范围 $\pm 2^\circ\text{C}$,响应时间 $>40\text{ s}$ 。模糊神经网络 PID 控制器温控在允许变化范围($\pm 2^\circ\text{C}$)内,响应时间 $<20\text{ s}$ 。对比结果表明模糊神经网络 PID 控制器具有控制精度高,对环境变化响应快速及自适应的特点,可以实现花茶制作过程中实时温、湿度精确调控的要求。

5 结论

文中分析花茶制作工艺对温、湿度调节的响应快、调控精准且平稳需求,提出由模糊控制+神经网络+PID 控制构成的组合控制模式,实现对温控系统的调控目的。通过对输入变量的模糊化处理,采用高斯隶属度函数,依据模糊规则进行推理生成输出量,为 PID 控制提供实时变化的输入调控因子 ΔK ,经 PID 运算后生成整定控制量,指挥执行单元动作,实现温控系统调控。系统通过 RBP 神经网络建立 Delat(δ)学习规则,以梯度下降算法进行隶属度中心值和基宽及输出权值的学习训练,使模

糊控制达到实时性、自适应性及快速逼近真值的目的。系统通过 Matlab 软件对传统 PID 控制和模糊控制及模糊神经网络 PID 3 种控制器进行模拟仿真,并以微波烘干机制作菊花茶为例分别对传统 PID 控制器和模糊神经网络 PID 控制器进行温控应用验证测试,其结果分析说明,模糊神经网络 PID 组合控制模式具有控制精度高,收敛速度快,抗干扰能力和系统鲁棒性好的优点,具有最好的动静态性能。因此该种控制模式完全可以满足花茶制作过程中对温、湿度快速精确调控的需求。

参考文献

- [1] 刘莹,郝心愿,郑梦霞,等. 茶树成花机理研究进展[J]. 茶叶科学, 2019, 39(1): 1-10.
- [2] 王萌. 食品加工智能恒温控制系统设计[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 219-222.
- [3] 赵世海,韩雪. 基于模糊神经网络 PID 的烘焙机温度控制[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(4): 83-88.
- [4] 欧艳华. 基于神经网络的自适应 PID 控制器设计[J]. 机械设计与制造, 2014(6): 263-265.
- [5] 舒爱民. 茉莉花茶加工湿管技术和工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 3-9.
- [6] 潘玉成,林高飞,陈小利,等. 基于模糊专家控制的茶叶炒制温度控制系统[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 79-84.
- [7] 王小勇,李兵,曾晨,等. 基于模糊算法的茶叶理条机温度控制设计[J]. 茶叶科学, 2015, 35(4): 363-369.
- [8] 冯华峰,潘海鹏,陈渭力. 在线自整定模糊 PID 温度控制系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(8): 95-97.
- [9] 李兵,孙长应,李为宁,等. 基于 DMC-PID 串级控制的茶叶远红外烘干机设计与试验[J]. 茶叶科学, 2018, 38(4): 410-415.
- [10] 刘辉,吴云洁,刘旺开,等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40, 66.
- [11] 唐雅楠,景会成,赵欣. 基于模糊神经网络 PID 算法的稀土冶炼炉温控制[J]. 电子设计工程, 2019, 27(8): 19-23.
- [12] 陈雪波,彭荟羽. 基于 RBF 神经网络钢包烘烤装置的节能优化[J]. 控制工程, 2014, 21(5): 765-770.
- [13] 胡亚南,李鑫,宁奎伟,等. 基于模糊 RBFNN-PID 的啤酒发酵温度控制系统[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 115-119, 175.
- [14] 曹成茂,吴正敏,梁闪闪,等. 茶叶杀青机双模糊控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 259-265.
- [15] 岳文杰,谢守勇,陈翀,等. 基于模糊 PID 的温室温度控制器设计与仿真[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 194-197.

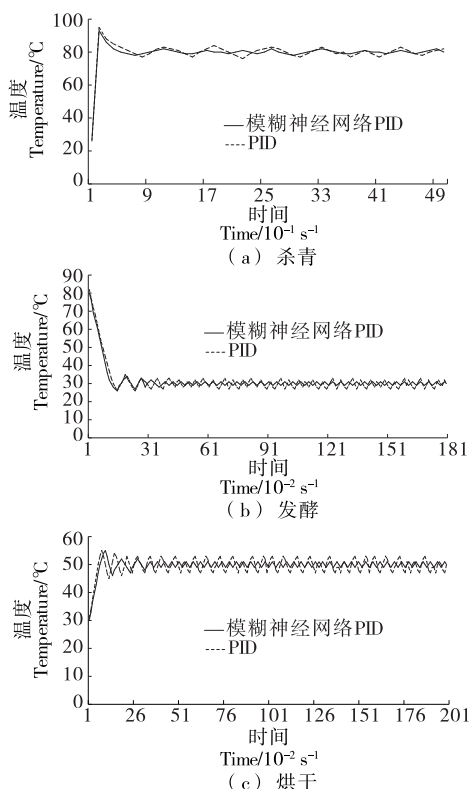


图 16 测试验证结果

Figure 16 Test validation results